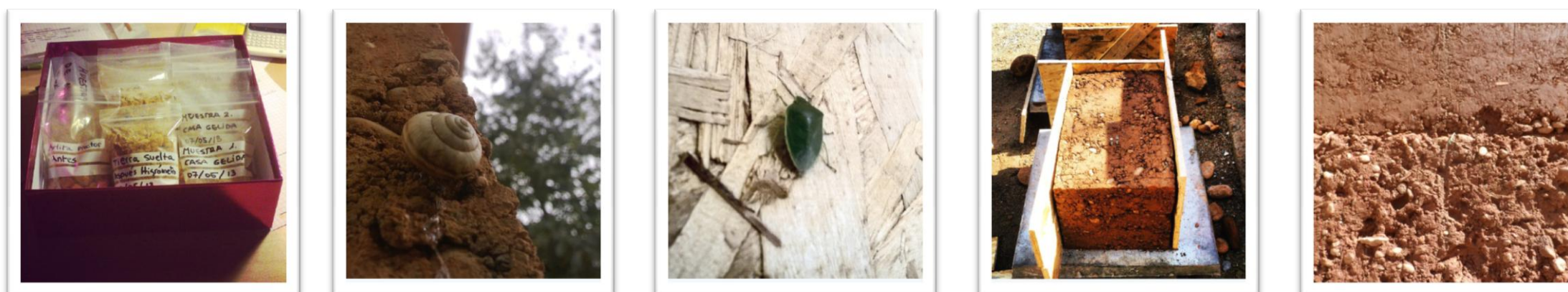


GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN PROYECTO FINAL DE GRADO



INFORME DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS Y MECÁNICAS DEL SISTEMA MODULAR S-LOW DE CONSTRUCCIÓN CON ESTRUCTURA DE MADERA Y ENVOLVENTE DE TAPIA

Proyectista: GONZÁLEZ SÁNCHEZ, BELÉN
Directoras: BOSCH, MONTSERRAT Y NAVARRO, ANTONIA
Convocatoria: NOVIEMBRE DE 2013

ÍNDICE

1. Prefacio	Página 5	6.5. Determinación del índice de plasticidad	Página 15
2. Introducción	Página 7	6.5.1. Objetivo	
3. Consideraciones previas	Página 9	6.5.2. Observaciones	
4. La tierra como material de construcción	Página 10	6.5.3. Proceso	
4.1. Inconvenientes	Página 10	6.5.4. Resultados	
4.1.1. La tierra no es un material de construcción estandarizado		6.6. Determinación del contenido de sales solubles	Página 15
4.1.2. La tierra se contrae al secarse		6.6.1. Objetivo	
4.1.3. La tapia no es impermeable		6.6.2. Proceso	
4.2. Ventajas	Página 10	6.6.3. Resultados	
4.2.1. La tierra regula la humedad ambiental		6.7. Determinación del contenido de sulfatos, nitratos, nitritos, y cloruros mediante tiras reactivas	Página 15
4.2.2. La tierra almacena calor		6.7.1. Objetivo	
4.2.3. La tierra ahorra energía y disminuye la contaminación ambiental		6.7.2. Proceso	
4.2.4. La tierra es un material reutilizable		6.7.3. Resultados	
4.2.5. La tierra economiza materiales de construcción y costes de transporte		6.8. Determinación con agua oxigenada del contenido de materia orgánica	Página 15
4.2.6. La tierra es apropiada para la autoconstrucción		6.8.1. Objetivo	
4.2.7. La tierra preserva la madera y otros materiales orgánicos		6.8.2. Observaciones	
4.2.8. La tierra absorbe contaminantes		6.8.3. Proceso	
5. Diseño y concepción del prototipo S-Low	Página 11	6.8.4. Resultados	
6. Caracterización de la tierra	Página 12	6.9. Unificación de resultados y criterios	Página 16
6.1. Análisis granulométrico de suelos por tamizado	Página 12	6.9.1. Análisis granulométrico de suelos por tamizado	
6.1.1. Objetivo		6.9.2. Determinación del límite líquido	
6.1.2. Observaciones		6.9.3. Determinación del índice de plasticidad	
6.1.3. Proceso		6.9.4. Contenido de sales solubles	
6.1.4. Resultados		6.9.5. Contenido de materia orgánica	
6.2. Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación	Página 14	7. Construcción del prototipo	Página 18
6.2.1. Objetivo		7.1. Tapia estabilizada con arlita	Página 19
6.2.2. Observaciones		7.2. Tapia estabilizada con cemento Portland	Página 20
6.2.3. Proceso		8. Caracterización de la tapia	Página 21
6.2.4. Resultados		8.1. Ensayo de compactación. Proctor modificado	Página 21
6.3. Determinación del límite líquido del suelo	Página 14	8.1.1. Objetivo	
6.3.1. Objetivo		8.1.2. Observaciones	
6.3.2. Observaciones		8.1.3. Proceso	
6.3.3. Proceso		8.1.4. Resultados	
6.3.4. Resultados		8.2. Ensayo de compactación. Proctor <i>in situ</i>	Página 22
6.4. Determinación del límite plástico de un suelo	Página 14	8.2.1. Objetivo	
6.4.1. Objetivo		8.2.2. Proceso	
6.4.2. Observaciones		8.3. Ensayo de compactación. Proctor indirecto	Página 23
6.4.3. Proceso		8.3.1. Objetivo	
6.4.4. Resultados		8.3.2. Observaciones	
		8.3.3. Proceso	
		8.3.4. Resultados	

8.4. Ensayo con tubo Karsten	Página 24	13. Agradecimientos	Página 49
8.4.1. Objetivo		Anexo A	Página 51
8.4.2. Observaciones			
8.4.3. Proceso		Anexo B	Página 57
8.4.4. Resultados			
8.5. Determinación del índice de rebote. Martillo Schmidt	Página 25	Anexo C	Página 75
8.5.1. Objetivo		Anexo D	Página 85
8.5.2. Proceso			
8.5.3. Resultados		Acreditación tercera lengua	Página 103
9. Caracterización de las probetas de tapia	Página 27		
9.1. Determinación de la densidad del material	Página 28		
9.1.1. Objetivo			
9.1.2. Proceso			
9.1.3. Resultados			
9.2. Ensayo del comportamiento térmico del material	Página 28		
9.2.1. Objetivo			
9.2.2. Proceso			
9.2.3. Resultados			
9.3. Ensayo de propagación del sonido por un medio, mediante ultrasonidos	Página 30		
9.3.1. Objetivo			
9.3.2. Observaciones			
9.3.3. Proceso			
9.3.4. Resultados			
9.4. Ensayo de monitorización de las probetas. Simulación verano	Página 30		
9.4.1. Objetivo			
9.4.2. Proceso			
9.4.3. Resultados			
9.5. Ensayo de monitorización de las probetas. Simulación invierno	Página 33		
9.5.1. Objetivo			
9.5.2. Proceso			
9.5.3. Resultados			
9.6. Ensayo de resistencia a compresión	Página 35		
9.6.1. Objetivo			
9.6.2. Observaciones			
9.6.3. Proceso			
9.6.4. Resultados			
10. Monitorización del prototipo	Página 37		
10.1. Ensayo de monitorización del prototipo	Página 39		
10.1.1. Objetivo			
10.1.2. Resultados			
11. Conclusiones	Página 45		
12. Bibliografía	Página 47		

1. PREFACIO

A partir de la iniciativa Casa S-Low, propuesta por los arquitectos Ángel Estévez y Sandra Martín fundadores de la empresa S-Low en colaboración con el laboratorio de materiales del departamento de Construcciones Arquitectónicas II, nacen diferentes líneas de investigación que todas tienen como premisa inicial la tierra como material de construcción y su experimentación *in situ* gracias a la construcción de un prototipo.

La investigación desarrollada en este Proyecto Final de Grado es la continuación de un proyecto anterior, realizado por los alumnos Luis Allepuz Macia y Cristian Poza Ortega, que consistió en la intervención activa en el proceso de construcción de un prototipo a escala real de 3,5 x 3,5 metros, compuesto de un cerramiento no portante de tapia, estructura de madera y cubierta ajardinada.

Los objetivos inicialmente planteados por el Proyecto Final de Grado de Cristian Poza y Luis Allepuz fueron:

1. Estudio previo de la tierra para determinar la idoneidad del material antes de ejecutar la tapia.
2. Planificación, organización y diseño de la obra antes de poner en marcha la construcción.
3. Colaboración en la construcción del prototipo, desde el replanteo inicial hasta la finalización de los trabajos de limpieza.
4. Colocación de sensores para la futura monitorización del prototipo.
5. Aportar propuestas de mejora, basadas en la experiencia obtenida mediante la construcción del prototipo.
6. Calibrado del software, puesta en funcionamiento de los sensores de temperatura y humedad del sistema de monitorización y recogida de datos.
7. Colocación de carga térmica, en el interior del prototipo, con la finalidad de obtener la temperatura de confort exigible a cualquier edificación según la normativa actual y recogida de datos.
8. Realización de ensayos para determinar el comportamiento de los diversos aislamientos utilizados.
9. Elaboración de certificaciones de productos como son DAU, DAP y DIT.
10. Confeccionar un informe detallado sobre las conclusiones y la viabilidad del sistema estudiado.

El planteamiento inicial del estudio fue muy ambicioso y extenso en tiempo por lo que, debido a la nueva normativa de la universidad, no fue posible llevarlo a cabo por completo y su proyecto se centró en:

- El estudio previo de las tierras para la ejecución de la tapia, mediante ensayos de laboratorio donde se caracterizan las muestras iniciales de tierra a usar en la ejecución del prototipo.
- La planificación, organización y estudios previos a la ejecución material del prototipo.
- La colaboración en la construcción del prototipo, desde el replanteo inicial hasta la finalización de la cubierta.
- La detección de errores constructivos y la mejora de los mismos basada en la experiencia obtenida durante el proceso de construcción.

Este contratiempo obligó a que otro alumno siguiera con el trabajo que ellos habían iniciado, dejando como punto fundamental a estudiar la monitorización del prototipo y la comparación simultánea entre ensayos *in situ* y en el laboratorio.

Cabe destacar que no es el único proyecto que se ha realizado partiendo del prototipo de Casa S-Low, sino que existen más proyectos orientados a la investigación de elementos complementarios como son:

- *Cubierta ajardinada S-Low* (Título sujeto a cambios) – Andrea Bonilla Iglesias, Proyecto Final de Grado.
- *Estudi de revestiments amb fibres vegetals* – Diego García Alcaraz, Proyecto Final de Grado.
- *Desarrollo y estudio de revestimientos con tierra y fibras vegetales a base de paja de cebada y cascarilla de arroz* – Laura Milla Coronado, Proyecto Final de Máster.
- *Anàlisi de formulacions per aïllaments tèrmics elaborats amb residus vegetals i aglomerants orgànics* – Nuria Gubianas Grifé, Proyecto Final de Grado.

Para realizar este proyecto no únicamente se ha partido de la iniciativa de Casa S-Low, sino que se han tomado como referencias diferentes proyectos finales de carrera anteriores que también tenían como eje central el estudio de la tierra y sus propiedades:

- *Anàlisi de la tàpia en obra construïda a partir de la caracterització del material, assajos no destructius (NDT) i assajos destructius (DT)* de Ana Badia Grañana.
- *Críteris d'execució i control de qualitat en la construcció en terra d'un habitatge unifamiliar a Martorelles* de Gisela Morera Roca y Àngels Pallarès Madrid
- *La tapia como sistema constructivo tradicional. Optimización y mejora de las propiedades térmicas y Análisis de Ciclo de Vida (ACV)* de Susana Serrano.

Por último, también se ha documentado este estudio a partir de la colaboración y la orientación proporcionada por el GREA, un grupo de investigación de la Universidad de Lleida, que nos ha aportado su visión más analítica del tema orientando nuestro trabajo y esfuerzo en garantizar que los datos proporcionados tanto *in situ* como en laboratorio sean lo más comparables posible y a la vez fácilmente interpretables y justificables para la diversidad del mercado a la que pueda ser destinado este material.

2. INTRODUCCIÓN

La gestión de la energía y de los recursos ambientales es indispensable para el desarrollo sostenible del planeta. Actualmente existen más de 7.000 millones de habitantes, 1.000 millones más que a finales del siglo XX, y en 2050 probablemente se superarán los 9.600 millones [1] [2] y, en consecuencia, ha crecido enormemente la demanda de recursos que, no sólo no se reducirá sino que aumentará debido al futuro gran aumento de población, que generará una gran demanda de energía en países desarrollados y al “progreso” de los países en vías desarrollo a los cuales se les está ofreciendo, en muchas ocasiones, un modelo de crecimiento poco sostenible.

Desde el sector de la construcción se está apostando por la introducción paulatina de nuevos materiales y sistemas de construcción más sostenibles que cumplan todos los requisitos que actualmente se le exigen a cualquier material, a través del Código Técnico de la Edificación, pero que ayuden a reducir la gran demanda de energía actual y futura. A partir de esta declaración de intenciones nace el proyecto Casa S-Low, que tiene como finalidad la construcción de viviendas respetuosas con el medio ambiente, sostenibles, con una demanda energética responsable pero que cubra las necesidades actuales de confort, a precio muy competitivo y de fácil y rápida construcción. Para dar respuesta a todas estas exigencias, el proyecto está basado en el sistema *Platform Frame*, es decir, la estructura está formada por un entramado de montantes y travesaños de madera arriostrados por paneles de madera; cerramiento de tapia y cubierta ajardinada.

Este sistema de construcción no es nuevo, se calcula que más del 30% de la humanidad vive en casas de tierra pero en zonas como Asia, China, India, Oriente Medio y América Latina, donde las necesidades de vivienda popular son más urgentes, este material es el predominante debido a su bajo coste. En Europa, la construcción en tierra forma parte de la tradición y del paisaje pero es una técnica de construcción en desuso para la mayor parte de la población y un redescubrimiento para la nueva arquitectura sostenible. [3]

El gran problema de la idea del sistema modular S-Low es el vacío normativo actual y el desconocimiento actual que se tiene sobre el material, sobre todo su comportamiento térmico en nuestro clima, el mediterráneo. Por este motivo los impulsores de la idea propusieron al laboratorio de materiales de la EPSEB una colaboración para llevar a cabo la construcción de un prototipo experimental, a escala real, donde poder dar respuesta a todas las dudas planteadas durante el proceso de concepción de la idea.

El proyecto resultó muy interesante y Montserrat Bosch, profesora de la EPSEB del DAC (Diploma de Ampliación de Competencias) *Impacto Ambiental de la edificación y rehabilitación energética*, y Antonia Navarro, profesora de la EPSEB de materiales de construcción, propusieron a un par de alumnos dedicar su Proyecto Final de Grado a colaborar en esta iniciativa. La idea inicial de trabajo fue muy ambiciosa y pronto constataron que el proyecto de colaboración tendría que dividirse en más Proyectos Finales de Grado o de Máster ya que las líneas de investigación, poco a poco, se fueron ramificando.

Este Proyecto Final de Grado es la continuación de uno anterior denominado *Informe de las propiedades Físicas y Mecánicas de la casa S-Low*, realizado por los alumnos Luis Allepuz y Cristian Poza, y tiene como objetivo implantar las bases para unificar la metodología de ensayo necesaria para realizar un control de calidad adecuado y aplicable a todas las construcciones de tapia, y estudiar el comportamiento de la tapia en el conjunto del sistema modular S-Low, tanto a nivel térmico como a nivel de resistencia, en clima mediterráneo y en ciudad.

Una vez fijados los objetivos, el proyecto se articula de forma lógica ordenando los ensayos y las experiencias linealmente consiguiendo un orden que no corresponde a la realidad ya que la mayoría de ensayos se han realizado en paralelo y, cómo no todos tienen relación directa entre ellos, incluso en orden inverso al expuesto en este proyecto, sin que esto afecte al resultado y a las conclusiones obtenidas.

Foto 2-1: Construcciones de tierra a nivel mundial



Fuente: CRAterre.

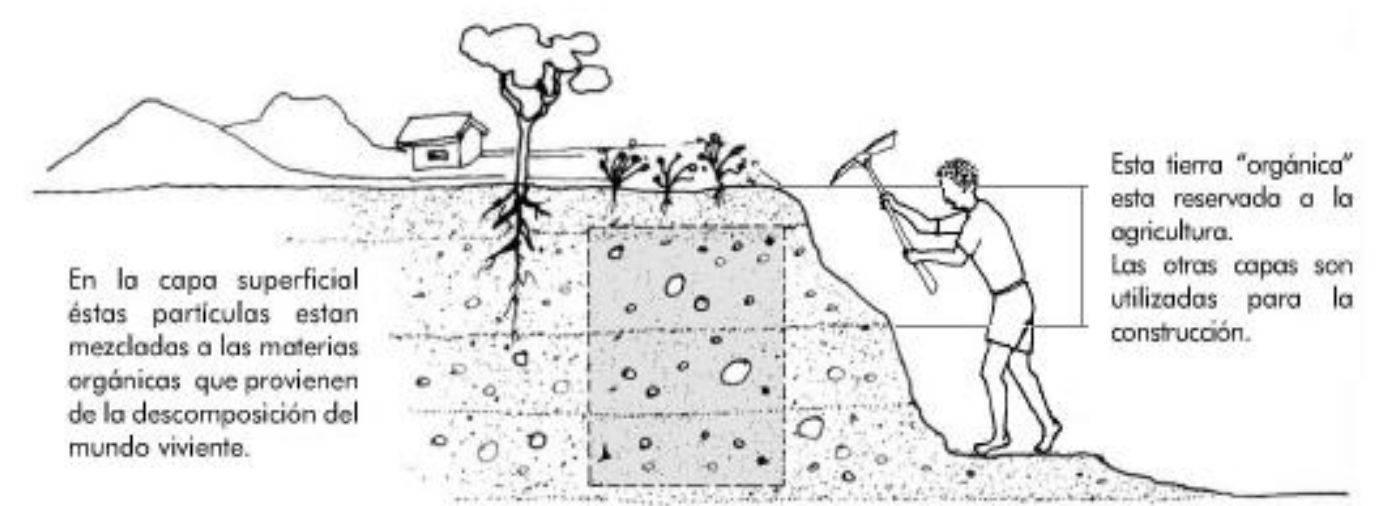
La innovación del sistema modular S-Low es la incorporación del entramado portante de madera que, a efectos de la normativa actual, nos garantiza la estructura de la construcción y nos cumple con los criterios marcados en el CTE, ya que actualmente el uso de muros de tapia como elemento estructural no cumple exactamente con las normativas estructurales actuales. Además, la combinación de tierra y madera es muy apropiada ya que la tierra preserva la madera de la agresión externa debido al bajo equilibrio de humedad y a la alta capilaridad de la tapia, evitando la aparición de insectos y hongos que puedan alterar la madera. [4]

3. CONSIDERACIONES PREVIAS

Actualmente, en el Código Técnico de la Edificación [5], la tierra cruda no tiene la consideración de material de construcción por lo que se regula dentro de la categoría de suelos cuando hablamos de seguridad estructural de cimientos. Este hecho implica que no exista ningún tipo de normativa reguladora, por el momento, y que la mayor parte de los ensayos y clasificaciones utilizadas durante el proyecto deriven de la normativa de suelos.

La tierra cruda es un material natural que proviene de la descomposición física, química y/o biológica de las rocas superficiales de la corteza terrestre. Aproximadamente 3/4 partes de la superficie del planeta Tierra son agua por lo que sólo nos queda 1/4 parte de tierra, pero no toda esta tierra es válida como material de construcción, hemos de tener en cuenta que en la capa superficial del suelo encontramos partículas de materia orgánica que provienen de la descomposición de residuos de procedencia tanto animal como vegetal. La tierra que contiene materia orgánica no es apta como material de construcción porque es un material alterable con el paso del tiempo.

Fotografía 3-1: Dibujo de la tierra válida como material de construcción



Fuente: Proyecto Final de Máster Arquitectura y construcción en tierra, estudio comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra.

Según el Código Técnico de la Edificación [5], la clasificación de los suelos se realiza según la tabla 3-2, donde, en función del diámetro de las partículas, se determina el nombre de las diferentes fracciones de suelo.

Tabla 3-2: Clasificación de los suelos según el Código Técnico de la Edificación

GRAVAS 60mm – 2mm	ARENAS 2mm – 0,063mm	LIMOS 0,063mm – 0,002mm	ARCILLAS < 0,002mm
Suelos gruesos. Con más del 50% de las partículas distinguibles a simple vista (aprox. 0,1mm).		Suelos finos. Con más del 50% de las partículas no distinguibles a simple vista (aprox. 0,1mm).	

Fuente: Proyecto Final de Grado Anàlisi de la tàpia en obra construïda a partir de la caracterització del material, assajos no destructius (NDT) i assajos destructius (DT).

En el artículo *Las normativas de construcción con tierra en el mundo* [6], se detallan las normativas que existen actualmente, y que están en vigor, sobre la construcción con tierra. A partir de este artículo se han desestimado todas aquellas que no hicieran referencia a la tapia, aunque excepcionalmente se ha tenido con referencia la normativa española en relación al BTC, y se han consultado.

No ha sido posible consultar todas las normativas, debido a su difícil acceso en algunos casos o a su coste elevado en otros. A continuación, en la tabla 3-3, se detallan las normativas a consultar y si se ha podido tener acceso a estas o no:

Tabla 3-3: Clasificación de las normativas sobre tapia en vigor

País	Norma/reglamento	Organización	Consulta	Observaciones
BRASIL	NBR 13553,1996	ABNT	Sí	Métodos de ensayo para suelo-cemento.
EEUU	NMAC,14.7.4, 2004	CID	Sí	Reglamento estatal de Nuevo México.
	ASTM E2392 M-10	ASTM	No	Consulta de coste económico elevado.
INDIA	IS 2110:1980	BIS	Sí	Paredes de suelo-cemento.
	IS 1725:1982	BIS	No	Recoge directrices de resistencia a terremotos por lo que no tiene relación con este PFG.
ITALIA	Ley nº378,2004		No	Recoge leyes para la conservación del patrimonio de tierra por lo que no tiene relación con este PFG.
	L.R. 2/06 2 2006		No	
NUEVA ZELANDA	NZS 4297:1998	SNZ	Sí	Según el artículo [6] es la normativa más completa y detallada.
	NZS 4298:1998	SNZ	Sí	
	NZS 4299:1999	SNZ	Sí	
ZIMBABUE	SAZS 724,2001	SAZ	No	Dificultad para acceder al documento completo.
ESPAÑA	UNE 41410:2998	AENOR	Sí	Primera norma Europea sobre BTC.

A pesar de que la normativa española regula bloques de tierra comprimida para muros y tabiques (BTC), se ha considerado importante tenerla presente por ser la primera normativa europea que regula el tema, por ser la única normativa estatal que abre la puerta a futuras normativas sobre tierra y porque es la base donde se fundamenta la normativa francesa, XP P13-901,2001 de AFNOR; que a su vez inspira la normativa colombiana NTC 5324,2004.

También sabemos que existe una normativa reguladora Alemana, las normativas DIN que son la base en las que se fundamenta el autor del libro *Manual de construcción en Tierra* [4], que es bastante completa pero a la que no ha sido posible tener acceso aunque se tiene la esperanza de acceder en futuros trabajos.

Tras analizar todas las normas podemos conformar un criterio propio con el que se analizará todo el estudio desarrollado a continuación, a través de los ensayos *in situ* y en el laboratorio.

4. LA TIERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

La tierra cruda es un material de construcción que tiene muchas posibilidades pero que se subestima debido normalmente a la falta de conocimiento, a su uso tradicional y a la utilización actual en países con pocos recursos o en vías de desarrollo.

Existen diferentes tipos de sistemas constructivos que utilizan la tierra cruda como materia prima, cómo son la tapia, el adobe, la utilización de balas de paja en interior y revestimiento de tierra en el exterior, el cob, el BTC y los costales de tierra. En este trabajo nos centraremos exclusivamente en la construcción con tapia.

La tierra cruda es el material principal para la construcción con tapia y para ello es necesario conocer cuáles son sus ventajas y sus inconvenientes antes de poder detallar cual será el control de calidad para la tapia. Para determinar las posibilidades que nos puede llegar a ofrecer este material de construcción partiremos de la visión de catedrático de la Universidad de Kassel, Alemania, Gernot Minke en su libro *Manual de construcción en Tierra* [4]:

4.1. INCONVENIENTES

- 4.1.1. **La tierra no es un material de construcción estandarizado.** La composición del material dependerá del lugar donde se extraiga por lo que su composición en arcillas, limos, arenas y gravas vendrá determinada por las características propias de la explotación. La variación en la composición nos refleja que tratamos con un material no procesado y muy heterogéneo, lo que implicará un estudio detallado de su composición para poder determinar sus características y poder modificarlas con aditivos en el caso que sea necesario.
- 4.1.2. **La tierra se contrae al secarse.** La tierra necesita agua para poder ser amasada y para que la arcilla que contiene actúe como aglomerante, pero una vez construida la tapia el agua de amasado se pierde por evaporación lo que puede producir fisuras. La retracción lineal durante el secado, en las construcciones de tapia, oscila del 0,4% al 2%. La retracción se puede disminuir reduciendo la cantidad de agua y arcilla, optimizando la composición granulométrica o mediante el empleo de aditivos.
- 4.1.3. **La tapia no es impermeable.** La tapia debe ser protegida contra la acción de la lluvia y las heladas especialmente en estado húmedo. Las paredes de tierra pueden protegerse con aleros, barreras impermeabilizantes, tratamientos específicos en su superficie, etc.

4.2. VENTAJAS

- 4.2.1. **La tierra regula la humedad ambiental.** Experimentos realizados en *Forschungslabor für Experimentelles Bauen*, universidad de Kassel, demostraron que la tierra tiene la capacidad de absorber o exudar la humedad más rápido y en mayor cantidad que cualquier otro material de construcción, por lo que puede regular el clima interior de una vivienda. Estos datos son muy importante ya que gracias a este material se puede garantizar el confort en humedad de una vivienda de forma natural.
- 4.2.2. **La tierra almacena calor.** La densidad de un material influye en la transmitancia térmica de un cuerpo, con un incremento de temperatura la masa del objeto no varía pero sí su volumen por lo que la densidad es inversamente proporcional a la temperatura, como la tierra es un material denso decimos que almacena las ganancias térmicas de forma pasiva en su interior y las libera de forma paulatina por lo que afirmamos que la tierra puede regular el clima interior de una vivienda.

- 4.2.3. **La tierra ahora energía y disminuye la contaminación ambiental.** Las labores de extracción, transporte y manipulación de la tierra tienen un bajo impacto ambiental en consumo de energía. Se necesita solamente un 1% de energía para realizar estas tareas en contraposición a otros métodos constructivos como son el hormigón armado o la fábrica industrializada.
- 4.2.4. **La tierra es un material reutilizable.** Si la tierra utilizada durante la construcción no incorpora aditivos que puedan transformar el material y convertirlo en un futuro residuo, podrá ser reutilizada una vez acabe la utilidad de la construcción, sólo será necesario triturar y humedecer la tierra para poder volver a ser usada como materia prima pero también podría ser devuelta a su lugar de origen sin afectar al medio.
- 4.2.5. **La tierra economiza materiales de construcción y costes de transporte.** La idea de construir edificios con tierra es el autoabastecimiento de materia prima que genera la propia obra, es decir, hasta ahora la tierra extraída de una excavación se contempla como un “residuo” pero si la utilizamos como materia prima para nuestra obra nos evitamos los grandes costes de desechar “el residuo” y nos ahorramos una gran parte de material en obra. En ocasiones tendremos que transportar tierra externa a obra por diversos motivos pero, aunque esto suceda, resulta más económico que otros materiales industriales del mercado.
- 4.2.6. **La tierra es apropiada para la autoconstrucción.** Las técnicas constructivas aplicadas al tapial no son difícilmente ejecutables, siempre y cuando se haya realizado una buena planificación de los trabajos, por lo que se pueden llevar a cabo por personas no especializadas en la construcción siempre que estén asesoradas, en todo momento, por un experto en la materia. Las técnicas constructivas más simples no necesitan de grandes herramientas y son económicas y fáciles de utilizar.
- 4.2.7. **La tierra preserva la madera y otros materiales orgánicos.** La tierra preserva de insectos y hongos la madera que se encuentre en contacto con ella debido a su bajo equilibrio de humedad, que se calcula entre el 0,4% y el 0,6% en peso, y a su alta capilaridad. Este fenómeno es debido a que los insectos necesitan una humedad mínima entre el 14% y el 18%, y los hongos una humedad superior al 20%. En cuanto a la materia orgánica, a la tierra se le pueden incorporar fibras naturales como la paja para mejorar sus prestaciones iniciales.
- 4.2.8. **La tierra absorbe contaminantes.** La sabiduría popular dice que las construcciones de tierra contribuyen a purificar el aire interior de las viviendas minimizando el polvo, los olores, las bacterias, la electricidad estática, etc. pero esta afirmación todavía no se ha podido comprobar. Sí es verdad que la tierra puede absorber contaminantes disueltos en agua y que este proceso es muy utilizado para filtrar sustancias en el agua y poder recuperarlas.

5. DISEÑO Y CONCEPCIÓN DEL PROTOTIPO S - Low

El objetivo de construir un prototipo a escala real y monitorizarlo es conocer las propiedades térmicas, mecánicas y el comportamiento de la tapia en clima mediterráneo y en ciudad.

5.1. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

El prototipo diseñado es cúbico formado por dos módulos de forjado, el inferior y el superior, y diez módulos de cerramiento de tapia que forman un espacio interior construido en planta de 3,54m x 3,54m y una altura de 2,9m.

La cimentación es superficial formada por una zapata corrida de bloques de hormigón rellenos de escombros y mortero. Dispone de una capa de mortero como acabado superficial para nivelar el conjunto. Sobre la cimentación se apoya el forjado sanitario formado por dos módulos prefabricados de OSBIII (4,68m²/panel) con aislamiento térmico de fibra de celulosa.

La estructura vertical se compone de un entramado de montantes y travesaños de madera OSBIII con uniones atornilladas. El cerramiento perimetral exterior está compuesto por muros de tapia de 50cm de espesor ejecutados in situ con medios manuales. No todo el cerramiento es igual, dos caras están estabilizadas con aditivos, cemento y arlita, para estudiar su comportamiento frente al uso de tapia tradicional. Existen dos accesos cerrados al prototipo, a modo de puertas, formados por una lámina de OSBIII de 15mm de grosor unida a la estructura mediante bisagras atornilladas. Para acabar, en la fachada Este se ha diseñado un cerramiento tipo sándwich, compuesto de aislamiento térmico de fibra de celulosa y un panel exterior formado por laminas machihembradas de madera de pino contrachapado.

La estructura de cubierta está formada por dos módulos prefabricados de OSBIII (4,68m²/panel) apoyados y atornillados a la estructura vertical. El acabado es una cubierta ajardinada extensiva no transitable dividida en dos zonas equivalentes de tal forma que la superficie orientada a Norte esté compuesta de EPDM, aislamiento de poliestireno extruido, lámina retenedora de 500g, espuma de poliuretano y tepe; en cambio la superficie orientada a Sur esté compuesta de EPDM, aislante de poliuretano extruido, lámina retenedora de 500g, lámina nodular de polietileno de alta densidad, geotextil antiraíces, mezcla de áridos y tepe.

5.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROTOTIPO

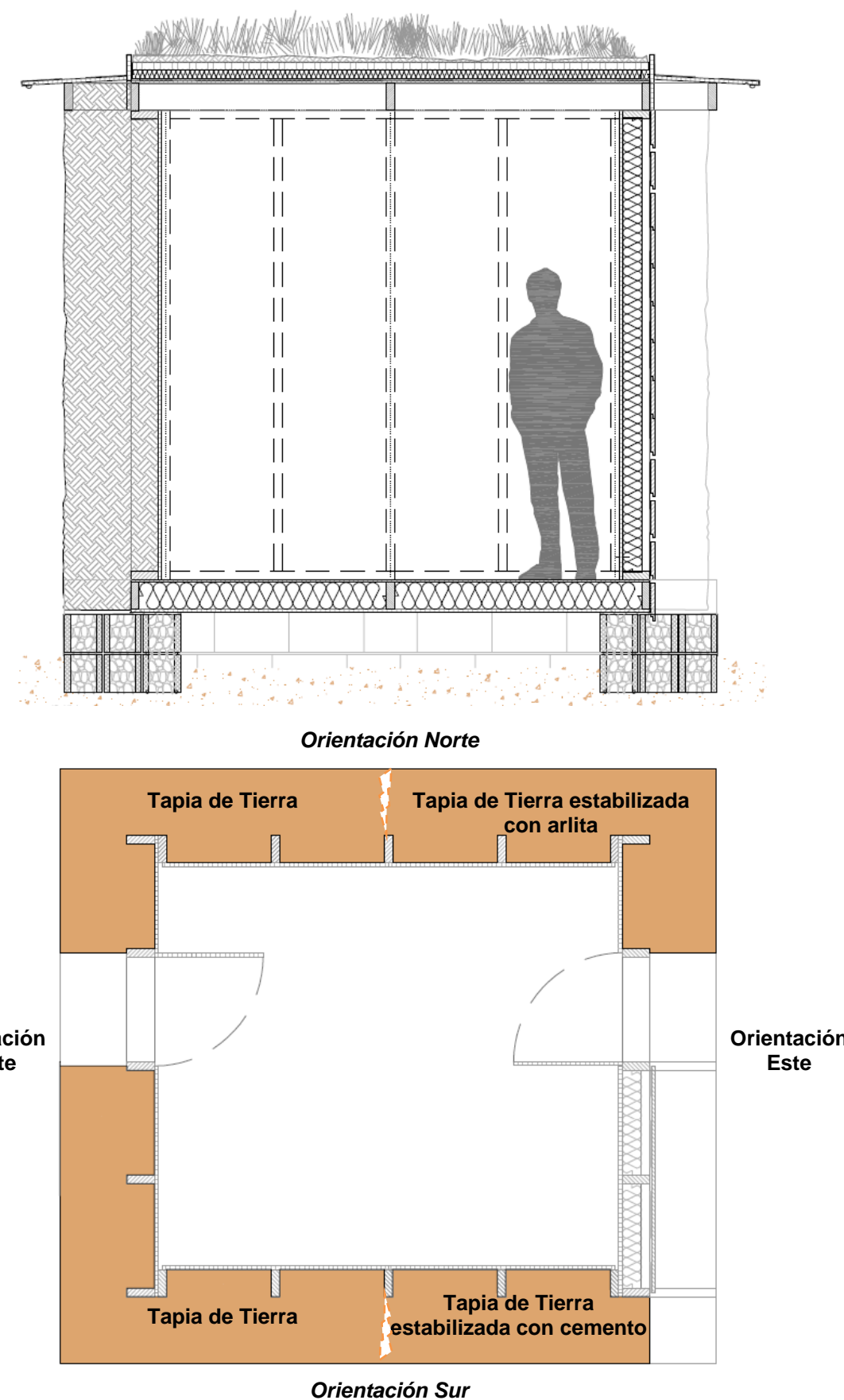
El prototipo se ha diseñado en esta escala ya que es el formato que más se aproxima a la realidad de una vivienda construida con tapia, pudiendo comprobar *in situ* cuales son las cualidades, inconvenientes y los aspectos a mejorar. En paralelo a la construcción del prototipo, se ha programado la ejecución de unas probetas, de 0,30m de ancho, 0,50m de profundidad y 0,3m de altura, que tendrán las mismas propiedades que la tapia construida pero de una dimensión menor para ser estudiadas, en el laboratorio de materiales de la EPSEB, y poder correlacionar los datos obtenidos.

5.3. PROCEDENCIA DE LA MATERIA PRIMA

La tierra utilizada para la ejecución del prototipo no proviene del lugar donde se construirá, ya que no se dispone de material suficiente en la propia obra. Se seleccionaron dos muestras de tierra, la primera procedía del “Parc de L’Alba” en Cerdanyola del Vallés y la segunda del polígono industrial de Aquiberia en Castellbisbal, y se sometieron a diferentes análisis con la finalidad de determinar cuál de estas dos sería la más indicada para la construcción del prototipo. Se optó por utilizar la tierra procedente del polígono industrial de Aquiberia en Castellbisbal por los siguientes motivos:

- La composición granulométrica de la tierra es más cercana a los estándares deseados.
- Dispone de un porcentaje menor de arcillas por lo que necesita menos agua para llegar al porcentaje de humedad óptima, las retracciones por secado serán menores y se minimizarán la aparición de grietas.
- La estabilidad, resistencia a compresión y durabilidad se suponen superiores.
- El color y la textura.
- El precio, ya sólo se abonan los gastos de transporte de las tierras.

Fotografía 5.1-1: Diseño en alzado y planta del prototipo



6. CARACTERIZACIÓN DE LA TIERRA

El estudio previo de la tierra, que posteriormente se utilizará para la realización de la tapia, es muy importante ya que nos permitirá conocer su dosificación exacta y su composición pudiendo variar sus propiedades iniciales adecuándolas a nuestras exigencias en el caso que fuera necesario. El estudio de las características iniciales de la tierra se realizará a partir de los siguientes ensayos normalizados de suelos:

- Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
- Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.
- Determinación de límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.
- Determinación del límite plástico de un suelo.
- Determinación del índice de plasticidad.
- Determinación del contenido de sales solubles de un suelo.
- Determinación del contenido de sulfatos mediante tiras reactivas.
- Determinación del contenido de nitratos y nitritos mediante tiras reactivas.
- Determinación del contenido de cloruros mediante tiras reactivas.
- Determinación del contenido de materia orgánica en los suelos con agua oxigenada.

Los resultados obtenidos, de los ensayos realizados, se compararán con los valores establecidos en las normativas mundiales consultadas, nombradas anteriormente en el punto 3 de este proyecto.

6.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO. UNE 103101:1995

6.1.1. OBJETIVO

Analizar la composición de la tierra que queremos utilizar en la tapia, a partir de la utilización de tamices normalizados según la norma UNE 7050-2, y determinar si tenemos un suelo compuesto por árido grueso o por árido fino.

6.1.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación pertenecen, en parte, al Proyecto Final de Grado *Informe de las propiedades físicas y mecánicas de la casa S-Low* debido a que para poder realizar el seguimiento de obra del prototipo tuvieron que determinar qué tipo de tierra era la óptima para su proyecto. A continuación sólo se expresan los datos de las tierras utilizadas para la construcción del prototipo porque lo interesante es conocer la tierra que sí será utilizada para la construcción y no aquella que fue descartada.

6.1.3. PROCESO

Los materiales y procedimientos utilizados para la realización de este ensayo se encuentran detallados en la UNE 103101:1995. Este ensayo se ha realizado con dos tipos de tierras diferentes, la primera es tierra proveniente de un solar en construcción del polígono industrial Aquiberia en Castellbisbal, Barcelona, que será la tierra base para la construcción de la tapia; la segunda es una mezcla entre la tierra base y arlita, de dos granulometrías diferentes. Durante la ejecución de este ensayo se han pesado las tierras retenidas en cada uno de los tamices, con los que se han realizado unas tablas donde se observan los pesos retenidos, los pesos acumulados, la masa y el porcentaje retenido en cada uno de los tamices (tabla 6.1.3-1 y tabla 6.1.3-3).

A partir de los porcentajes de tierra retenida se definen sus curvas granulométricas que serán comparadas con la curva de Fuller 32, curva de máxima compacidad, conociendo la tipología de suelo a la que pertenece nuestra muestra (gráfica 6.1.3-2, gráfica 6.1.3-4 y gráfica 6.1.3-5). Es importante conocer, aunque se explicará con mayor exactitud en el próximo punto de este proyecto, el porcentaje de arlita utilizada en el segundo ensayo granulométrico para comprender los futuros resultados obtenidos:

- 59,82% de tierra procedente del Castellbisbal.
- 4,46% de arlita de entre 3 y 8mm de diámetro.
- 35,72% de arlita de entre 8 y 10mm de diámetro.

Tabla 6.1.3-1: Granulometría muestra Castellbisbal de tierra

Tamices. Designación y oberturas (mm)	Retenido tamices parcial (g)	Retenido acumulado tamices total (g)	Retenido tamices parcial (%)	Pasa en muestra total	
				(g)	%
32	0,00	0,00	0,00	3655	100,00
25,4	154,80	154,80	4,24	3500,20	95,76
16	205,60	360,40	5,63	3294,60	90,14
8	246,10	606,50	6,73	3048,50	83,41
4	191,50	798,00	5,24	2857,00	78,17
2	89,30	887,30	2,44	2767,70	75,72
1	70,80	958,10	1,94	2696,90	73,79
0,5	79,90	1038,00	2,19	2617,00	71,60
0,25	78,30	1116,30	2,14	2538,70	69,46
0,125	69,80	1186,10	1,91	2468,90	67,55
0,063	105,00	1291,10	2,87	2363,90	64,68
< 0,063	2363,90	3655	64,68	0,00	0,00

Gráfica 6.1.3-2: Curva granulométrica muestra Castellbisbal de tierra vs Fuller 32

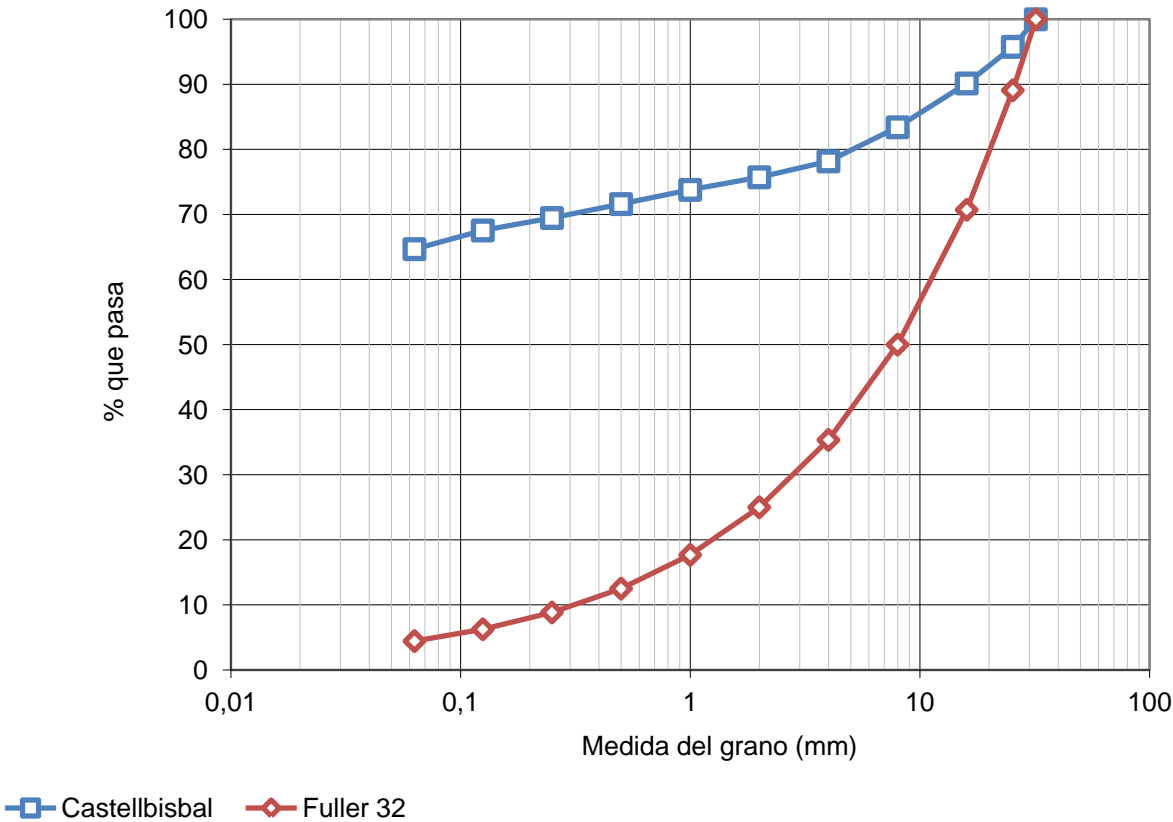
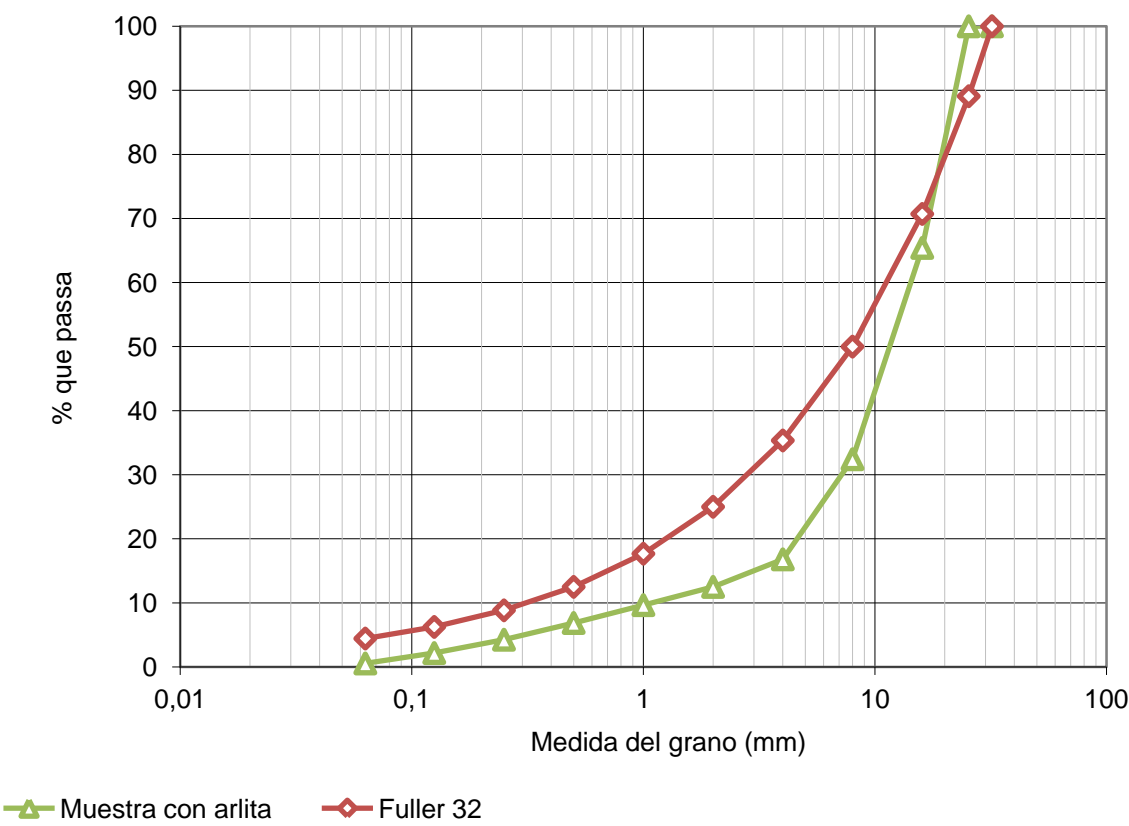


Tabla 6.1.3-3: Granulometría muestra tierra con arlita, con dos granulometrías diferentes

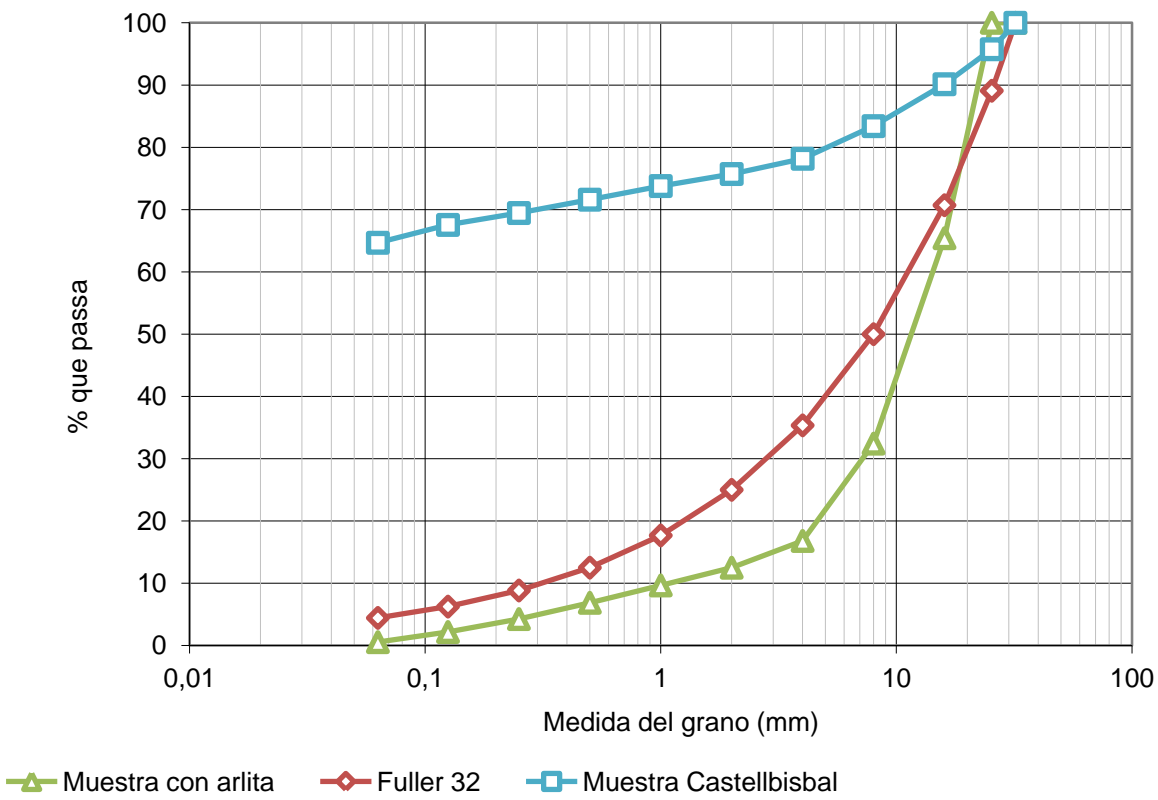
Tamices. Designación y oberturas (mm)	Retenido tamices parcial (g)	Retenido acumulado tamices total (g)	Retenido tamices parcial (%)	Pasa en muestra total	
				(g)	%
>16	0,00	0,00	0,00	2992	100,00
16	1034,79	1034,79	34,59	1957,21	65,41
8	987,08	2021,87	32,99	970,13	32,42
4	467,51	2489,38	15,63	502,62	16,80
2	128,68	2618,06	4,30	373,94	12,50
1	85,08	2703,14	2,84	288,86	9,65
0,5	83,52	2786,66	2,79	205,34	6,86
0,25	78,03	2864,69	2,61	127,31	4,26
0,125	62,26	2926,95	2,08	65,05	2,17
0,063	48,66	2975,61	1,63	16,39	0,55
< 0,063	16,39	2992	0,55	0,00	0,00

Gráfica 6.1.3-4: Curva granulométrica muestra tierra con arlita vs Fuller 32



6.1.4. RESULTADO

Gráfica 6.1.3-5: Comparativa de las granulometrías anteriores vs Fuller 32



Cómo podemos observar en la gráfica comparativa, entre la granulometría de la muestra inicial de tierra de Castellbisbal y la muestra que contiene tierra estabilizada con arlita (gráfica 6.1.3-5), la granulometría que más se aproxima a la curva de Fuller es la muestra que contiene arlita como aditivo siendo esta la que se aproxima mejor a la curva teórica de máxima compactad, que más a delante intentaremos averiguar si influye significativamente en la compactad de la tierra.

Si clasificamos las dos muestras anteriores según *la clasificación unificada de Casagrande* obtenemos que la muestra inicial de Castellbisbal es un suelo cohesivo de arcillas de mediana plasticidad. En cambio, la muestra de Castellbisbal con aditivo de arlita es un suelo granular compuesto de gravas mal graduadas, mezclas de arena y gravas con pocos finos o sin ellos.

La explicación para la gran diferencia que existe entre la granulometría inicial de Castellbisbal y la que está estabilizada con arlita es, la proporción de la mezcla. Al incorporar arlita y disminuir el porcentaje de tierra inicial pasamos de tener una muestra de suelo cohesivo a una de suelo granular, aumentando la permeabilidad del material, disminuyendo su cohesividad y su compactad.

Puede que con este aditivo consigamos mejorar las propiedades térmicas del material, pero perdiendo cohesión y compactación, que son dos propiedades importantes cuando se realizan construcciones con tapia.

6.2. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS FINOS POR SEDIMENTACIÓN. MÉTODO DEL DENSÍMETRO. UNE 103102:1995

6.2.1. OBJETIVO

Determinar cuantitativamente los porcentajes de arenas finas, limos y arcillas que contiene un suelo.

6.2.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación pertenecen, en parte, al Proyecto Final de Grado *Informe de las propiedades físicas y mecánicas de la casa S-Low* debido a que para poder realizar el seguimiento de obra del prototipo tuvieron que determinar qué tipo de tierra era la óptima para su proyecto. A continuación sólo se expresan los datos de las tierras utilizadas para la construcción del prototipo porque lo interesante es conocer la tierra que sí será utilizada para la construcción y no aquella que fue descartada.

6.2.3. PROCESO

Los materiales y procedimientos utilizados para la realización de este ensayo se encuentran detallados en la UNE 103102:1995. Una vez realizado el ensayo y transcurridos 20 minutos de reposo, exigidos en la normativa, podemos comprobar cuál es el porcentaje de arenas finas, limos y arcillas que contiene la muestra analizada.

6.2.4. RESULTADO

Observamos que no existe una diferencia clara entre la separación de limos y arcillas, por eso determinamos que la muestra carece de limos por lo que toda la muestra que pasa a través del tamiz 0,063 se compone únicamente de arcillas.

6.3. DETERMINACIÓN DE LÍMITE LÍQUIDO DE UN SUELO POR EL MÉTODO DEL APARATO DE CASAGRANDE. UNE 103103:1994

6.3.1. OBJETIVO

Determinar la humedad que necesita un suelo para que pierda su plasticidad y no pueda ser modelado.

6.3.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación pertenecen, en parte, al Proyecto Final de Grado *Informe de las propiedades físicas y mecánicas de la casa S-Low* debido a que para poder realizar el seguimiento de obra del prototipo tuvieron que determinar qué tipo de tierra era la óptima para su proyecto. A continuación sólo se expresan los datos de las tierras utilizadas para la construcción del prototipo porque lo interesante es conocer la tierra que sí será utilizada para la construcción y no aquella que fue descartada.

6.3.3. PROCESO

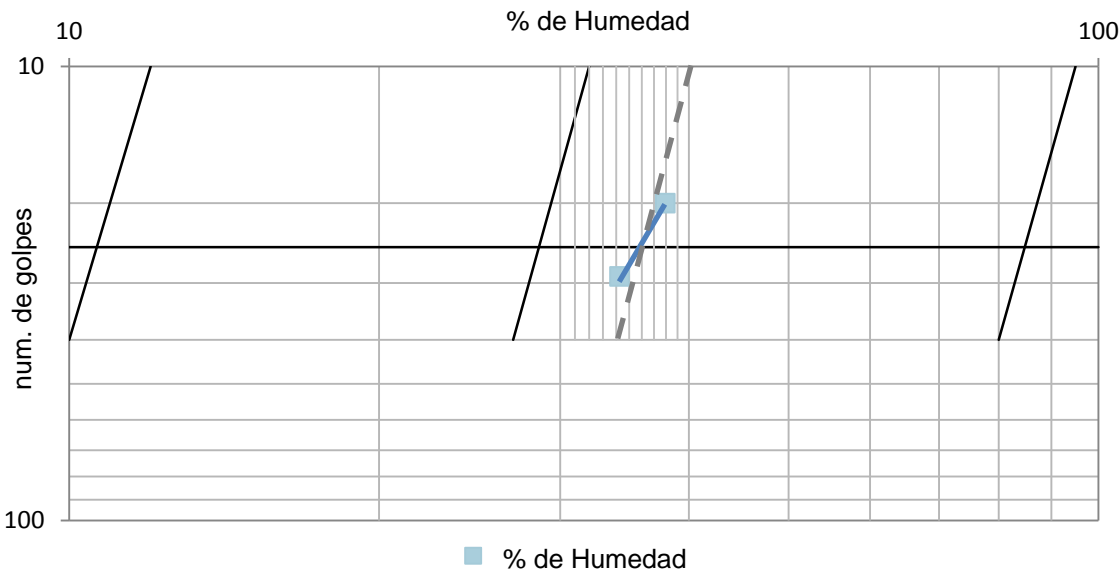
Los materiales y procedimientos utilizados para la realización de este ensayo se encuentran detallados en la UNE 103103:1994. A continuación se analizan los datos obtenidos para establecer el límite líquido de la muestra a través de la tabla 6.3.3-1, donde se relaciona la humedad de la tierra para cada una de las determinaciones del ensayo.

Tabla 6.3.3-1: Resultados ensayo determinación del límite líquido

Muestra	Determinaciones	
	Entre 25 – 15 golpes	Entre 35 – 25 golpes
Número golpes	20	29
Peso húmedo (g)	23,38	15,17
Peso seco (g)	16,95	11,30
Peso del agua (g)	6,43	3,87
Humedad (%)	37,94	34,25

Los resultados se han representado en la gráfica 6.3.3-2, donde se relacionan el número de golpes con la humedad, en escala logarítmica, de la muestra.

Gráfica 6.3.3-2: Resultados ensayo determinación del límite líquido



En la gráfica se traza una línea paralela, gris discontinua, a las líneas de trazos dibujadas en el gráfico, que equidiste de los dos puntos determinados entre 25-15 y 35-25 golpes. La humedad del punto de intersección de esta recta con la ordenada correspondiente a los 25 golpes, expresada con una cifra decimal y sin añadir las palabras tanto por ciento, es el límite líquido.

6.3.4. RESULTADO

Nuestro límite líquido del 36% de humedad.

6.4. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DE UN SUELO. UNE 103104:1993

6.4.1. OBJETIVO

Determinar la humedad mínima que necesita un suelo para ser modelado.

6.4.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación pertenecen, en parte, al Proyecto Final de Grado *Informe de las propiedades físicas y mecánicas de la casa S-Low* debido a que para poder realizar el seguimiento de obra del prototipo tuvieron que determinar qué tipo de tierra era la óptima para su proyecto. A continuación sólo se expresan los datos de las tierras utilizadas para la construcción del prototipo porque lo interesante es conocer la tierra que sí será utilizada para la construcción y no aquella que fue descartada.

6.4.3. PROCESO

Los materiales y procedimientos utilizados para la realización de este ensayo se encuentran detallados en la UNE 103104:1993. Para obtener el límite plástico se realiza la media aritmética de las humedades de las dos determinaciones, siempre que estas dos no difieran más de un 2%.

Tabla 6.4.3-1: Resultados ensayo determinación del límite plástico

Muestra	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (g)	Humedad (%)
SM 1	8,06	6,50	1,56	24,00
SM 2	11,48	9,25	2,23	24,11

Tal y cómo podemos observar en la tabla 6.4.3-1, los valores obtenidos durante el ensayo fueron para la SM1 (submuestra 1) un valor de 24,00% y para la SM2 (submuestra 2) un valor de 24,11%.

6.4.4. RESULTADO

El límite plástico de la muestra corresponde al 24,05% de humedad.

6.5. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD

6.5.1. OBJETIVO

Determinar el rango de humedades en el cual nuestro suelo tiene comportamiento plástico.

6.5.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación pertenecen, en parte, al Proyecto Final de Grado *Informe de las propiedades físicas y mecánicas de la casa S-Low* debido a que para poder realizar el seguimiento de obra del prototipo tuvieron que determinar qué tipo de tierra era la óptima para su proyecto. A continuación sólo se expresan los datos de las tierras utilizadas para la construcción del prototipo porque lo interesante es conocer la tierra que sí será utilizada para la construcción y no aquella que fue descartada.

6.5.3. PROCESO

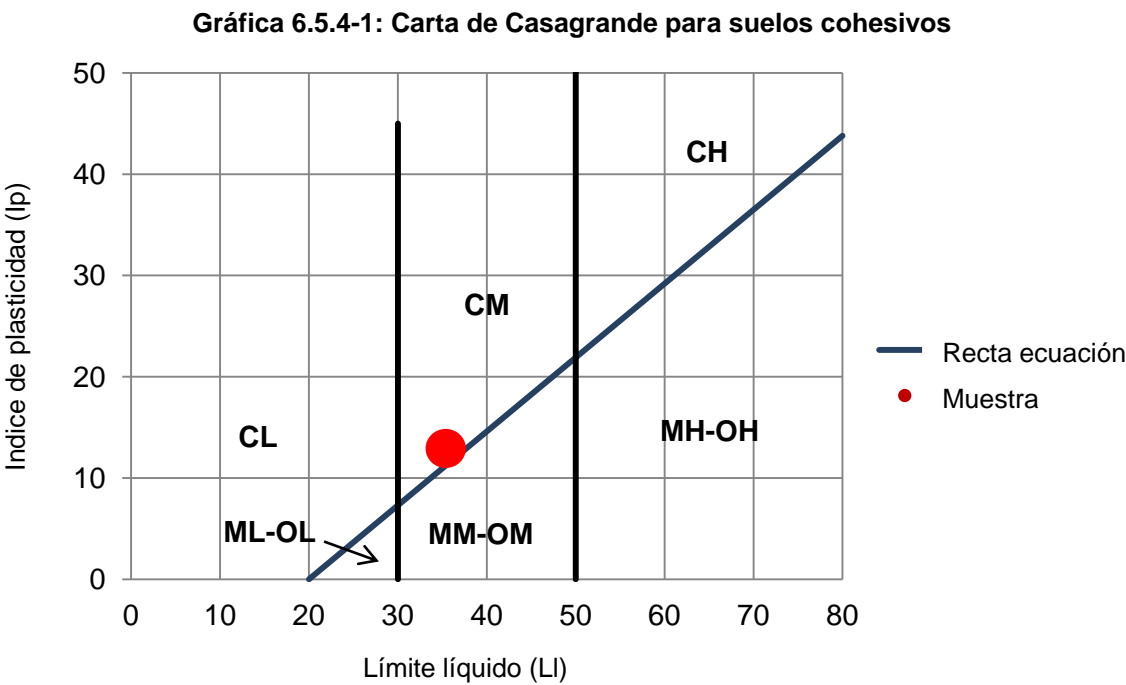
El procedimiento consiste en analizar los datos obtenidos del límite líquido y del límite plástico, el índice de plasticidad es la diferencia entre esos dos valores. Estos datos los reflejamos en la tabla 6.5.3-1.

Tabla 6.5.3-1: Índice de plasticidad de la muestra

	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad
Muestra	36,00	24,05	11,95

6.5.4. RESULTADO

Los datos de la tabla anterior se han interpretado a partir de la Carta de Casagrande para suelos Cohesivos, gráfica 6.5.4-1, en ella podemos observar que nuestra tierra pertenece, según esta clasificación, a un suelo arcilloso inorgánico de mediana plasticidad.



6.6. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE SALES SOLUBLES DE UN SUELO. UNE 103205:2006

6.6.1. OBJETIVO

Determinar de forma cuantitativa los gramos de sales solubles que contiene el suelo estudiado.

6.6.2. PROCESO

Los materiales y procedimientos utilizados para la realización de este ensayo se encuentran detallados en la UNE 103205:2006. Los resultados del ensayo para la muestra de tierra Castellbisbal se muestran en la tabla 6.6.2-1. Para obtener la proporción del residuo de sales solubles por litro de extracto acuoso se ha utilizado la expresión siguiente:

$$\frac{r}{v} \times 1000$$

Siendo:

r = Masa en gramos del residuo de la cápsula. En nuestro caso será la media de los resultados.

v = Volumen en cm³ del extracto acuso situado en la cápsula.

El resultado se expresa en gramos de residuo de sales por litro de extracto acuso.

Tabla 6.6.2-1: Resultado ensayo sales solubles

Muestra	Peso inicial tierra P (g)	Volumen inicial V (cm³)	Volumen líquido filtrado v (cm³)	Sales solubles en tierra		g _{residuo} /l	%
				r (g)	Media r (g)		
M1	50	500	100	0,34	0,40	4	0,04
M2	50	500	100	0,46			

6.6.3. RESULTADO

Tenemos un porcentaje de sales solubles del 0,04%.

6.7. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE SULFATOS, NITRATOS, NITRITOS Y CLORUROS MEDIANTE TIRAS REACTIVAS

6.7.1. OBJETIVO

Conocer de forma cualitativa el contenido de sulfatos, nitratos, nitritos y cloruros que contiene nuestro suelo.

6.7.2. PROCESO

El procedimiento consiste en diluir una muestra de tierra con agua destilada y posteriormente analizar esta agua con la tira reactiva, que al reaccionar nos dará una escala de colores que se comparará con la leyenda del embase. De esta forma conoceremos de manera cualitativa el contenido de sulfatos, nitratos, nitritos y cloruros que contiene nuestro suelo. El ensayo se repite en dos ocasiones para comprobar los resultados.

6.7.3. RESULTADO

Nuestra tierra contiene > 400 mg/l de SO₄²⁻ (sulfatos), 10mg/l de NO₃⁻ (nitratos), 1 mg/l de NO₂⁻ (nitritos) y 0mg/l de Cl⁻ (cloruros).

6.8. DETERMINACIÓN CON AGUA OXIGENADA DEL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA EN LOS SUELOS. UNE 7368:1977

6.8.1. OBJETIVO

Determinar de forma aproximada el contenido de materia orgánica que contiene nuestro suelo.

6.8.2. OBSERVACIONES

Existen otras normativas más precisas que determinan el contenido de materia orgánica en un suelo como son la UNE 103204:1003, determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico, o la UNE 7441, método de oxidación con dicromato de potasio; pero se ha optado

por utilizar esta normativa, que nos aporta los datos aproximados, por ser más sencilla a nivel de ejecución, más económica y porque a la tierra ensayada se le ha retirado la tierra orgánica de las capas superficiales.

6.8.3. PROCESO

Los materiales y procedimientos utilizados para la realización de este ensayo se encuentran detallados en la UNE 7368:1977. Para obtener el porcentaje de materia orgánica se ha utilizado la expresión siguiente:

Porcentaje de materia orgánica = (P - P') / P x 100

Siendo:
P = Muestra seca inicial, en gramos.
P' = Muestra seca después del ensayo, en gramos.

Los resultados del ensayo para la muestra de tierra Castellbisbal se muestran en la tabla siguiente, tabla 6.10.3-1.

Tabla 6.8.3-1: Resultado ensayo contenido de materia orgánica con agua oxigenada

	Peso muestra inicial	Peso recipiente	Peso después del ensayo	Peso muestra después del ensayo
Muestra	20,00gr	232,32gr	252,02gr	19,70gr

6.8.4. RESULTADO

Nuestra tierra contiene 1,5% de materia orgánica.

6.9. UNIFICACIÓN DE RESULTADOS Y CRITERIOS

Se han consultado 5 normativas mundiales diferentes con las que vamos a confeccionar un criterio propio, a partir de la experiencia personal y de los consejos de autores anteriores, partiendo de los datos obtenidos anteriormente.

Tabla 6.9-1: Relación de ensayos con las condiciones normativas de los diferentes países consultados

Ensayo	País	Condiciones normativa
Análisis granulométrico de suelos por tamizado	ESPAÑA	Se recomienda que la granulometría cumpla con el diagrama de huso, figura 4 de la normativa UNE 41410:2008. No se admiten tierra con un contenido menor al 10% de arcillas.
	BRASIL	El 100% de la tierra utilizada tiene que pasar por el tamiz de 4,8mm y del 15% al 50% de la tierra por el tamiz 0,075mm.
	EEUU	El suelo no tendría que contener rocas superiores a 1 y ½ pulgadas, unos 3,8cm aproximadamente, ni tampoco contener terrones de arcilla de más de ½ pulgada de diámetro, unos 1,27cm de diámetro.
	INDIA	El porcentaje mínimo de arenas es de un 35% en masa.
Determinación límite líquido	ESPAÑA	Valor contenido entre 25% y 50%.
	BRASIL	El valor debe ser inferior o igual al 45%.
	INDIA	El valor máximo aceptable es un 27%.
Determinación del índice de plasticidad	ESPAÑA	Se recomienda que esté dentro del diagrama de plasticidad, figura 5 de la normativa UNE 41410:2008.
	BRASIL	Debe ser inferior o igual al 18%
	INDIA	Valor contenido entre 8,5% y 10,5%

Contenido de sales solubles	ESPAÑA	El valor máximo aceptado es del 2%.
	EEUU	El valor máximo aceptado es del 2%.
	INDIA	El valor máximo aceptado es del 1% de sales solubles totales, en masa. Para sales de sodio el máximo aceptado es del 1% en masa y para sales de sodio el máximo aceptado es del 1% en masa. El agua no puede superar el máximo del 1% de sulfatos de sodio.
Contenido de materia orgánica	ESPAÑA	Valor máximo del 2%.
	BRASIL	Mínima cantidad posible de materia orgánica.
	EEUU	Suelo libre de materia orgánica.
	INDIA	Mínima cantidad posible de materia orgánica.
	NUEVA ZELANDA	Mínima cantidad posible de materia orgánica.

A partir de los ensayos expuestos en la tabla 6.11-1, podemos determinar ensayo por ensayo cual es el criterio más factible de aplicar en nuestro territorio y podremos concluir que resultados nos han aportado los ensayos anteriores.

6.9.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

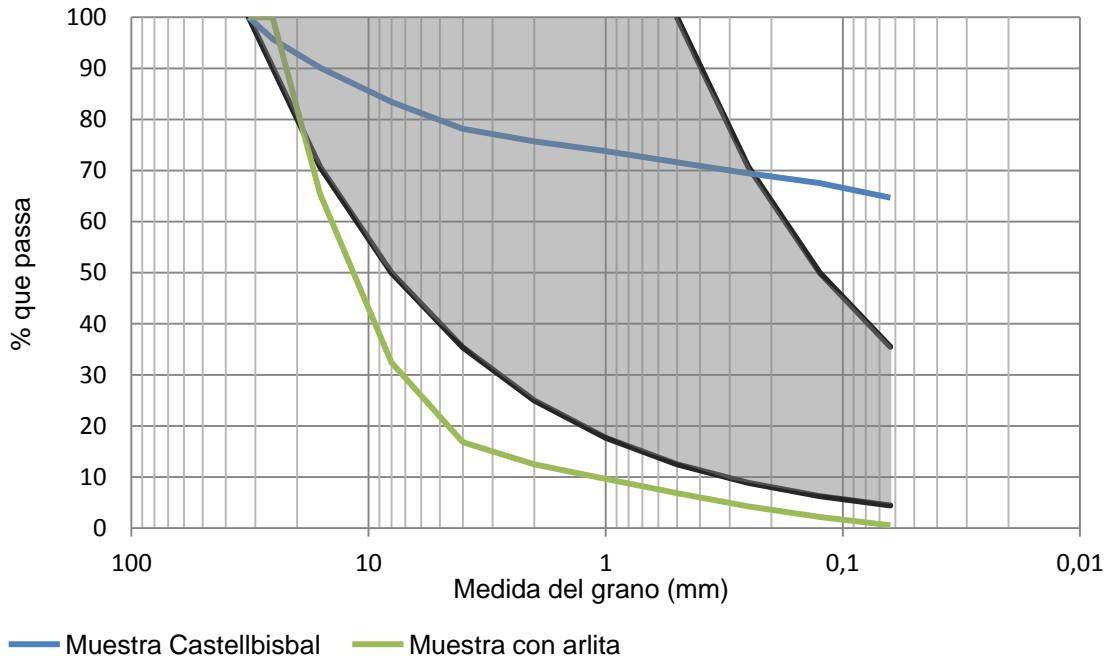
La normativa de Brasil es muy restrictiva y utiliza una granulometría de tierra muy pequeña en comparación con otras normativas por la que no la vamos a tomar como referencia.

La normativa de EEUU es sencilla de cumplir ya que sus requisitos son superior a los que nos marca la UNE 103101:1995, con la que hemos realizado el ensayo granulométrico.

La normativa de India la tomamos como dato recomendado ya que es posible que no siempre se pueda conseguir este mínimo de arenas y además la curva de Fuller, con la que hemos comparado nuestros ensayos, no contempla en sus límites un 35% de arenas sino que su dato es inferior.

Por lo tanto, tomaremos como referencia la normativa de España que es una recomendación, por lo que siempre intentaremos obtener los datos marcados pero si no es posible no significa que no podamos utilizar esa tierra o que sea de baja calidad para ser utilizada como materia prima de la tapia. Esta normativa sí es estricta en el porcentaje mínimo de arcillas a utilizar ya que la arcilla es necesaria para actuar como aglutinante del conjunto de la tapia.

Gráfica 6.9.1-1: Diagrama de huso, normativa UNE 41410:2008



6.9.1.1. CONCLUSIONES

Nuestras dos muestras no siguen la recomendación de la normativa UNE 41410:2008, tal y cómo se puede ver en la gráfica 6.9.1-1, pero eso no significa que la tierra utilizada sea desechable. Lo único que nos indica la normativa es que según su experiencia, si la curva granulométrica está en el interior de la figura tiene un mejor comportamiento pero no es excluyente.

Si cumplimos el porcentaje mínimo de arcilla necesaria para considerar nuestra tierra apta para la construcción de tapia. La muestra de tierra estabilizada con arlita no cumpliría con el mínimo exigido de arcillas pero como no va a ser un elemento por separado sino que uno de los dos componentes del muro a construir también consideramos que es una muestra válida. En el caso de que se fuera a utilizar solamente esta proporción no lo sería.

6.9.2. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO

Las normativas que determinan las limitaciones del límite líquido tienen todas una cierta conexión, excepto la de la India que es la más restrictiva y nos limita a un valor aceptable hasta el 27%.

Para este ensayo tomaremos como criterio una mezcla entre la normativa de Brasil y la de España, de tal forma que el valor aceptado para el límite líquido está comprendido entre el 25% y el 45%.

6.9.2.1. CONCLUSIONES

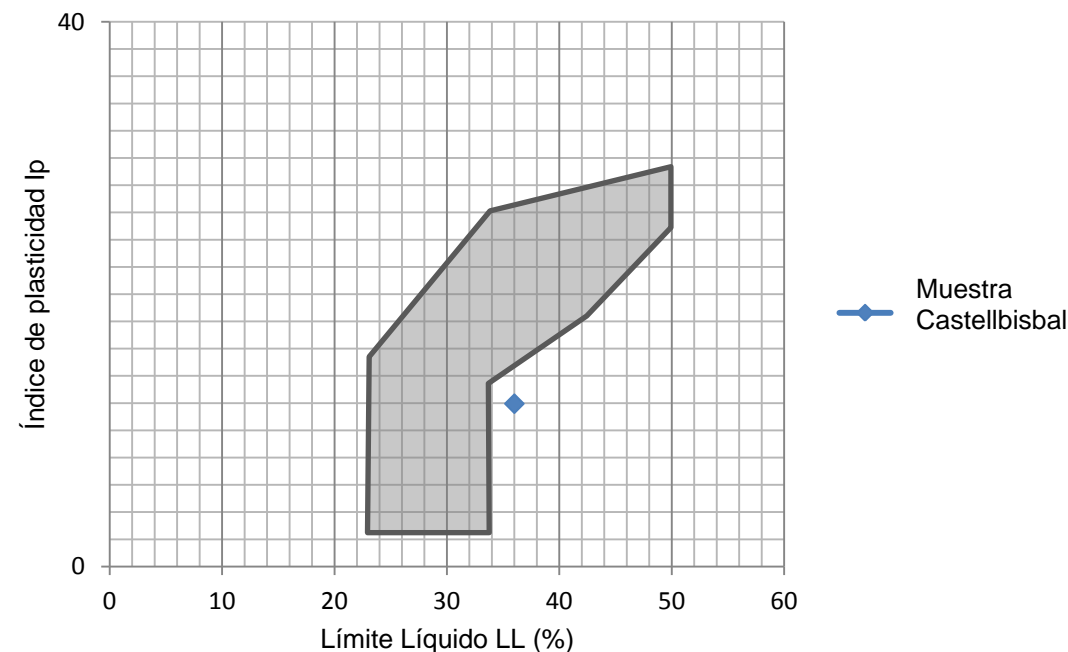
Nuestro límite líquido del 36% de humedad, por lo que estaría dentro del valor que nosotros consideramos como aceptado.

6.9.3. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Cómo volvemos a observar en esta norma, la India es la más restrictiva y nos limita entre 8,5% y 10,5% el índice de plasticidad. La normativa de Brasil, es un poco más tolerante y llega hasta el 18%.

Nosotros en este caso analizaremos nuestra muestra en función del diagrama de plasticidad de la normativa UNE 41410:2008 y fijaremos como mínimo un índice de plasticidad del 18%.

Gráfica 6.9.3-1: Diagrama de plasticidad, normativa UNE 41410:2008



6.9.3.1. CONCLUSIONES

Cómo podemos ver, la muestra de Castellbisbal, no entraría dentro del diagrama orientativo que propone la normativa pero eso no significa que no podamos utilizar esa tierra o que sea de baja calidad para ser utilizada como materia prima de la tapia.

Por otra parte nosotros tenemos un índice de plasticidad del 11,95% que sí está dentro de aceptado por la normativa de Brasil, por lo que aceptamos como válida la muestra y los datos obtenidos.

6.9.4. CONTENIDO DE SALES SOLUBLES

Las normativas consultadas sólo hacen referencia a las sales solubles y no a la determinación de cloruros, nitratos, nitritos o sulfatos, a excepción de la normativa India que sí especifica la no tolerancia de las sales de sodio y a los sulfatos de sodio.

Si nos centramos sólo en las sales solubles, tanto la normativa Española como la de EEUU consideran el límite en el 2% de sales solubles, frente al 1% de la India.

Nosotros consideraremos como valor aceptable hasta el 2% de sales solubles debido a la ubicación geográfica donde nos encontramos y a la proximidad del mar.

6.9.4.1. CONCLUSIONES

Nuestra muestra tiene un contenido en sales solubles del 0,04%, por lo que cumpliría tanto nuestro límite marcado del 2% como el de la normativa India.

6.9.5. CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA

Muchas de las normativas consultadas llegan a la conclusión de que el porcentaje de materia orgánica que puede contener la tierra para la tapia debe ser el mínimo posible. Algunas incluso consideran que debe ser nula pero esta rotundidad es muy difícil llevar a la práctica.

Nosotros tomaremos como límite el de la normativa Española que determina que el máximo permitido es del 2%.

6.9.4.1. CONCLUSIONES

Nuestra muestra tiene un contenido en materia orgánica del 1,5% por lo que está dentro de lo permitido.

7. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO









Una vez conocidas las características de la tierra, se pueden empezar los trabajos de construcción del prototipo. El seguimiento de la obra no forma parte de este proyecto por lo que para más información se puede consultar el proyecto *Informe de las propiedades Físicas y Mecánicas de la casa S-Low*, realizado por los alumnos Cristian Poza y Luis Allepuz.

La construcción de los cerramientos de tapia duró 12 días laborables y los trabajos se ejecutaron del viernes 15 de marzo al miércoles 4 de abril de 2013. Los tiempos de ejecución fueron más elevados de lo esperado ya que la intención era tener los muros acabados antes de la festividad de Semana Santa. Durante la construcción de la tapia se colocaron, en el interior de los muros, los sensores para poder realizar la monitorización de la cara Norte y Sur del prototipo.

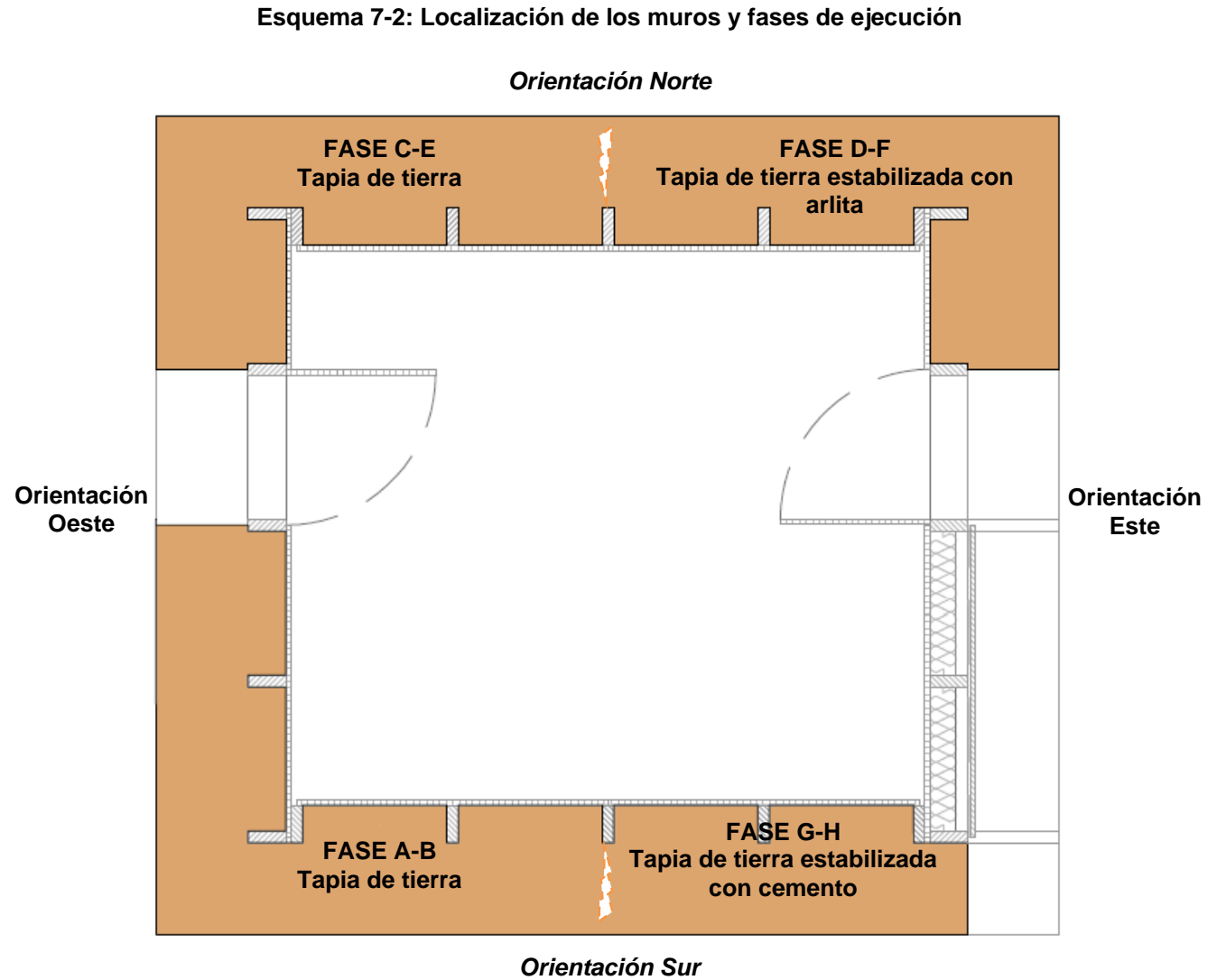
En paralelo a la ejecución de la tapia también se realizaron las probetas, que fueron acopiadas en el exterior hasta acabar los trabajos, para luego poder desplazarlas al laboratorio y poder ensayarlas. En la tabla siguiente, tabla 7-1, se relacionan los trabajos ejecutados con el tiempo destinado a cada uno de ellos.

Tabla 7-1: Trabajo realizados en función del tiempo de ejecución en obra

Día	Trabajo
Viernes 15 de marzo	Construcción de tapia inferior sin estabilizar, sección A. <div><div>Fotografía 7-1.1 </div><div>Fotografía 7-1.2 </div></div>
	Colocación de sensores de temperatura y humedad en la sección A. Construcción de tapia superior sin estabilizar, sección B. Construcción de probetas T1 y T2 de tierra sin estabilizar. <div><div>Fotografía 7-1.3 </div><div>Fotografía 7-1.4 </div><div>Fotografía 7-1.5 </div></div>
Miércoles 20 de marzo	Construcción de tapia inferior sin estabilizar, sección C. <div><div>Fotografía 7-1.6 </div><div>Fotografía 7-1.7 </div></div>
Viernes 22 de marzo	Construcción de tapia inferior estabilizada con arlita, de 3 a 8mm de diámetro, sección D. <div><div>Fotografía 7-1.8 </div><div>Fotografía 7-1.9 </div></div>
Lunes 25 de marzo	Colocación de sensores de temperatura y humedad tanto en la sección C como en la sección D. Construcción de tapia superior sin estabilizar, sección E. Construcción de probeta A1 de tierra estabilizada con arlita de 3 a 8mm de diámetro. <div><div>Fotografía 7-1.10 </div><div>Fotografía 7-1.11 </div><div>Fotografía 7-1.12 </div></div>

Martes 26 de marzo	<p>Construcción de tapia superior estabilizada con arlita, de 3 a 8mm de diámetro y de 8 a 10mm de diámetro, sección F.</p> <p>Fotografía 7-1.13</p>  <p>Fotografía 7-1.14</p> 
Martes 2 de abril	<p>Construcción de tapia superior estabilizada con arlita, de 3 a 8mm de diámetro y de 8 a 10mm de diámetro, sección F.</p> <p>Fotografía 7-1.15</p>  <p>Fotografía 7-1.16</p> 
Miércoles 3 de abril	<p>Construcción de tapia inferior estabilizada con cemento Portland, sección G. Colocación de sensores de temperatura y humedad en la sección G. Construcción de probetas A2, A3 de tierra estabilizada con arlita de 3 a 8mm de diámetro y de 8 a 10mm de diámetro. Construcción de probeta A4 de tierra estabilizada con arlita, con una proporción superior de arlita de granulometría de 8 a 10mm de diámetro a las anteriores.</p> <p>Fotografía 7-1.17</p>  <p>Fotografía 7-1.18</p>  <p>Fotografía 7-1.19</p> 
Jueves 4 de abril	<p>Construcción de tapia superior estabilizada con cemento Portland, sección H.</p> <p>Fotografía 7-1.20</p>  <p>Fotografía 7-1.21</p> 

Como ya se ha comentado anteriormente, no todos los muros de tapia son iguales, existen dos muros estabilizados con materiales diferentes. A continuación se describen sus características y su ubicación en el conjunto, esquema 7-2, del prototipo.



7.1. TAPIA ESTABILIZADA CON ARLITA

Durante la concepción de la idea se decidió estabilizar con arlita la mitad de los muros orientados a Norte, para poder estudiar la efectividad como aislante de este material en contraposición a la tapia sin estabilizar. La proporción inicial de arlita se realizó en volumen de forma que tres carretillas de tierra, que corresponden a unos 180l aproximadamente, se mezclaron con un saco de 25l de arlita, de entre 3 y 8mm de diámetro, consiguiendo una mezcla inicial de un 12,2% de arlita sobre el total de volumen de tierra estabilizada.

La ejecución consistió en concentrar la tierra estabilizada en el interior del muro y completar los extremos con tierra sin estabilizar, es decir, conformar un muro tipo sándwich donde el interior esté estabilizado y los exteriores no, tal y cómo se muestra en el esquema 7.1-1.

Al completar la parte inferior del muro se detectaron dos inconvenientes:

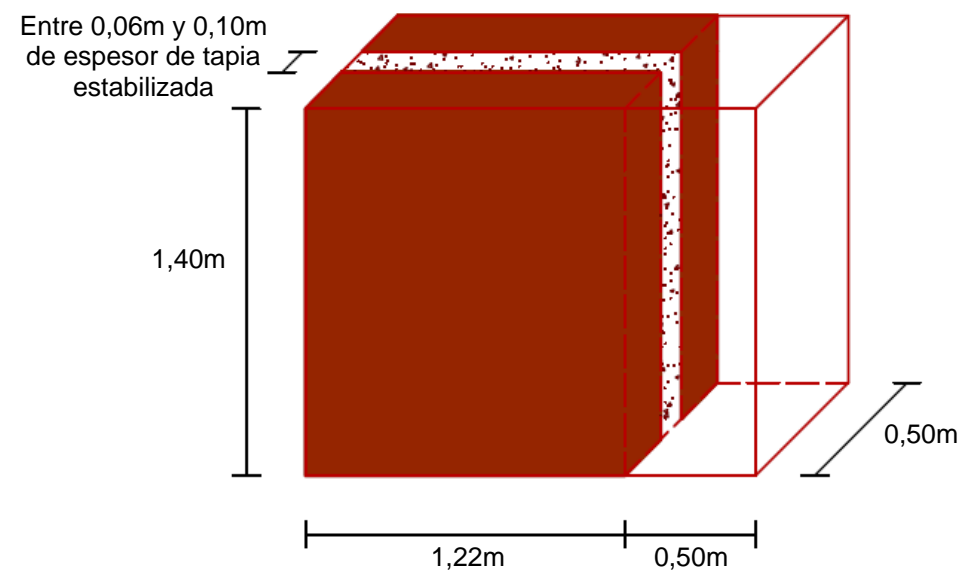
- Se había destinado el 50% de la mezcla para la parte inferior del muro y era probable que no quedara suficiente mezcla para completar la parte superior.
- No se disponía de más arlita para poder repetir la dosificación inicial.

Para solventar los inconvenientes se optó por comprar dos sacos más de arlita de 50l cada uno, aunque tenía una granulometría diferente de entre 8 y 10mm de diámetro, y retocar el cálculo de proporciones iniciales de tal forma que la nueva mezcla se realizó con el 50% de la tierra que ya teníamos inicialmente y se añadió toda la arlita comprada. Las nuevas proporciones quedan de la siguiente forma:

- 59,82% de tierra sin estabilizar.
- 4,46% de arlita de entre 3 y 8mm de diámetro.
- 35,72% de arlita de entre 8 y 10mm de diámetro.

Los sensores se colocaron en la tapia estabilizada con la segunda mezcla ya que se decidió que sería más interesante saber que sucedería donde la proporción de arlita era mayor, y porque muy probablemente los datos obtenidos, en cuanto a aislamiento térmico se refiere, serían más cercanos a los esperados en el planteamiento inicial del proyecto.

Esquema 7.1-1: Ejecución de la mitad del muro estabilizado con arlita



Fotografía 7.1-2: Ejecución tapia en probeta estabilizada con arlita

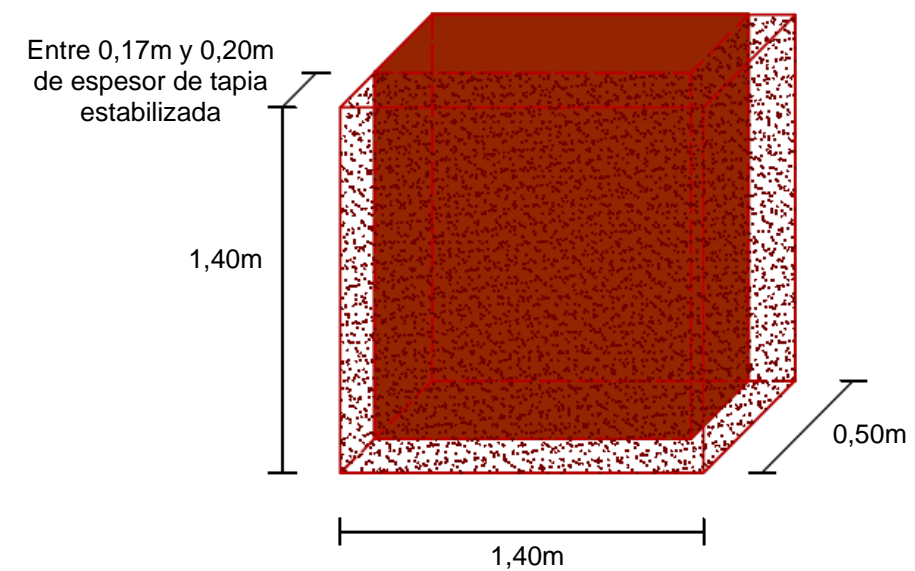


7.2. TAPIA ESTABILIZADA CON CEMENTO PORTLAND

Durante la concepción de la idea se decidió estabilizar con cemento Portland la mitad de los muros orientados a Sur para comparar la resistencia y el acabado entre las dos partes de la tapia, esquema 7.1-3. Para los arquitectos impulsores de la idea era muy importante el acabado final de la tapia ya que no se pretende revestir el material, como sí sucede con las construcciones tradicionales de tapia, y por eso es importante la resistencia del acabado frente a las agresiones externas.

La proporción de cemento Portland y tierra se realizó en volumen de forma que tres carretillas de tierra, que corresponden a unos 180l aproximadamente, se mezclaron con un cubo de cemento, que son aproximadamente 6l, consiguiendo una mezcla de un 3,22% de cemento sobre el total de volumen de tierra estabilizada.

Esquema 7.1-3: Ejecución de la mitad del muro estabilizado con cemento



Fotografía 7.1-4: Ejecución tapia en probeta estabilizada con arlita



8. CARACTERIZACIÓN DE LA TAPIA

Una vez construida la tapia se estudiarán diferentes aspectos en relación a su compacidad, densidad, humedad, absorción de agua, entre otros y se intentarán relacionar con los datos obtenidos en laboratorio. El estudio de las características de la tapia exterior se realizará a partir de los siguientes ensayos:

- Ensayo de compactación. Proctor modificado.
- Ensayo de compactación. Proctor *in situ*.
- Ensayo de compactación. Proctor indirecto.
- Ensayo con tubo Karsten.
- Determinación del índice de rebote. Martillo Schmidt.

Cuando se realizó la propuesta para este proyecto también se incluyó el estudio de las retracciones del prototipo, pero al ser un elemento a gran escala se consideró que sería mucho más interesante realizar un estudio completo con algún estudiante de último curso de Ingeniería Técnica Topográfica o de Grado en Ingeniería Geomática y Topografía. Por este motivo no se han realizado ningún estudio sobre las retracciones.

8.1. ENSAYO DE COMPACTACIÓN. PROCTOR MODIFICADO. UNE 103501:1994

8.1.1. OBJETIVO

Determinar la humedad óptima para conseguir la densidad seca máxima de la tierra a ensayar.

8.1.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación pertenecen, en parte, al Proyecto Final de Grado *Informe de las propiedades físicas y mecánicas de la casa S-Low* debido a que para poder realizar el seguimiento de obra del prototipo tuvieron que determinar qué tipo de tierra era la óptima para su proyecto.

8.1.3. PROCESO

Los materiales y procedimientos utilizados para la realización de este ensayo se encuentran detallados en la UNE 103501:1994. Este ensayo consiste en la repetición del ensayo, tantas veces como se estime necesario, para hallar, mediante una gráfica, la humedad que corresponde a la densidad seca máxima. Los ensayos se realizan con dos muestras, la primera muestra corresponde a la tapia sin estabilizar, tabla 8.1.3-1, tabla 8.1.3-2 y el gráfico 8.1.3-3; y la segunda muestra corresponde a la tapia estabilizada con arlita, tabla 8.1.3-4, tabla 8.1.3-5 y el gráfico 8.1.3-6; de 3 a 8mm de diámetro y de 8 a 10mm de diámetro.

Tabla 8.1.3-1: Cálculo ensayo proctor modificado muestra sin estabilizar

Cálculo densidad seca				Cálculo humedad		
Agua (%)	Suelo + agua (g)	Suelo (g)	Densidad seca (g/cm³)	Suelo húmedo (g)	Suelo seco (g)	Humedad (%)
w	S + a	$s = \frac{(s + a) \times 100}{100 + w}$	$\rho = s/v^*$	sh	sc	$s = \frac{(sh - sc)}{sc} 100$
2%	4415	4145,87	1,261	100	93,88	6,51
4%	4460	4175,64	1,270	100	93,63	6,81
5%	4475	4186,13	1,273	100	93,56	6,88
6%	4500	4200,11	1,278	100	93,34	7,14
7%	4490	4125,70	1,255	100	91,88	8,83
8%	4500	4086,70	1,243	100	91,56	9,28
9%	4490	4060,78	1,235	100	90,44	10,57
12%	4490	3963,63	1,206	100	88,28	13,28

* El volumen del molde es de 3287,77 cm³

Tabla 8.1.3-2: Resultado ensayo proctor modificado muestra sin estabilizar

Núm. Proctor	Densidad seca (g/cm³)	Humedad (%)
1	1,261	6,51
2	1,270	6,81
3	1,273	6,88
4	1,278	7,14
5	1,255	8,83
6	1,243	9,28
7	1,235	10,57

Gráfico 8.1.3-3: Resultado comparativo ensayo proctor modificado muestra sin estabilizar

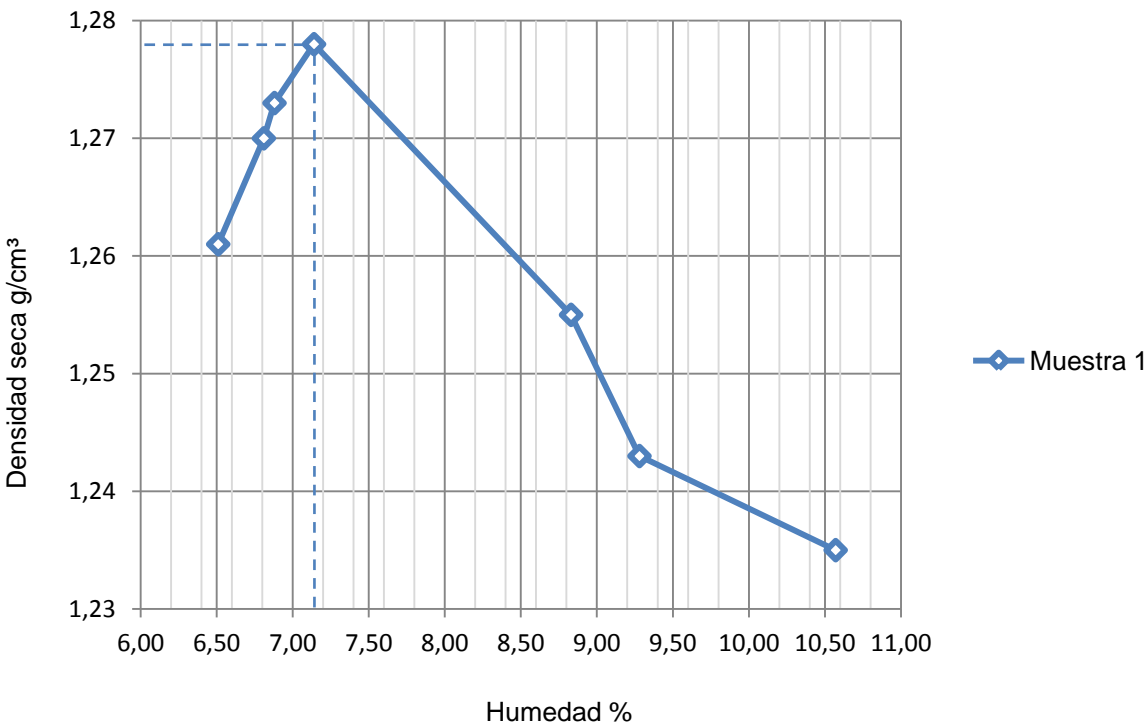


Tabla 8.1.3-4: Cálculo ensayo proctor modificado muestra estabilizada con arlita

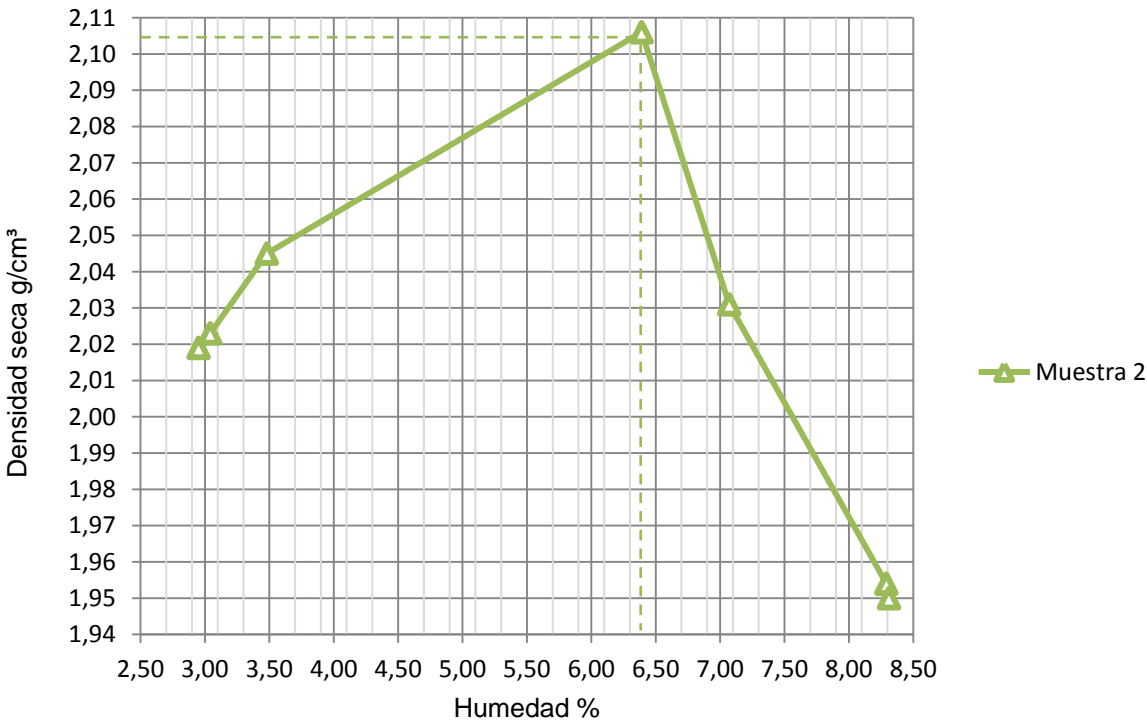
Cálculo densidad seca				Cálculo humedad		
Agua (%)	Suelo + agua (g)	Suelo (g)	Densidad seca (g/cm³)	Suelo húmedo (g)	Suelo seco (g)	Humedad (%)
w	S + a	$s = \frac{(s + a) \times 100}{100 + w}$	$\rho = s/v^*$	sh	sc	$s = \frac{(sh - sc)}{sc} 100$
2%	6770	6637,255	2,019	100	106,844	2,95
3%	6850	6650,485	2,023	100	99,160	3,04
3,5%	6960	6724,638	2,045	100	167,120	3,48
4%	7200	6923,077	2,106	100	103,416	6,39
5%	7010	6676,190	2,031	100	101,860	7,07
6%	6810	6424,528	1,954	100	101,576	8,29
7%	6860	6411,215	1,950	100	126,920	8,31

* El volumen del molde es de 3287,77 cm³

Tabla 8.1.3-5: Resultado ensayo proctor modificado muestra estabilizada con arlita

Núm. Proctor	Densidad seca (g/cm ³)	Humedad (%)
1	2,019	2,95
2	2,023	3,04
3	2,045	3,48
4	2,106	6,39
5	2,031	7,07
6	1,954	8,29
7	1,950	8,31

Gráfico 8.1.3-6: Resultado comparativo ensayo proctor modificado muestra estabilizada con arlita



8.1.4. RESULTADOS

Como podemos observar en las gráficas:

- La muestra 1 obtiene la densidad más elevada en 1,278 g/cm³ que corresponde con una humedad del 7,14%, gráfica 8.1.3-3.
- La muestra 2 obtiene la densidad más elevada en 2,156 g/cm³ que corresponde con una humedad del 6,40%, gráfica 8.1.3-6.

Es importante conocer esta relación debido a que conseguiremos la densidad máxima del material, lo que implicará una menor porosidad de los muros, garantizando su durabilidad y su resistencia mecánica; y además se limitará la humedad de la tierra durante la ejecución de la obra, evitando retracciones innecesarias o falta de humedad durante la construcción.

Este ensayo sería lógico hacerlo antes de construir la tapia para tener presente estos resultados, pero en nuestro caso el ensayo es posterior a la construcción por lo que el siguiente paso es intentar contrastar estos datos obtenidos en el laboratorio con el prototipo construido *in situ* a través del ensayo no normalizado que hemos denominado “proctor *in situ*”.

El ensayo “proctor *in situ*” se realizó el día 3 de mayo de 2013, un mes después de la finalización de la obra.

8.2. ENSAYO DE COMPACTACIÓN. PROCTOR IN SITU

8.2.1. OBJETIVO

Comprobar cuál es la humedad real y la densidad seca real del prototipo.

8.2.2. PROCESO

El ensayo consiste en la extracción de una muestra geométrica, cúbica o circular, de la que se pueda determinar su volumen y su porcentaje de humedad para poder realizar los mismo pasos que con el ensayo proctor modificado.

Este ensayo no se ha podido realizar porque la tapia no permite la extracción de un testigo, tal y cómo realizaríamos en una estructura de hormigón, y la muestra extraída es simplemente tierra disgregada o en formato polvo por lo que no se ha podido obtener una muestra geométrica con la que poder calcular la densidad seca. La única forma de obtener esta muestra sería mediante un ensayo destructivo con el que extraeríamos una gran cantidad de material, destruyendo parte del muro, mediante una sierra radial. Como no es esta la finalidad del ensayo se determina como conclusión que este tipo de ensayo no está preparado para este tipo de material y que sería necesario estudiar otra técnica aplicable a la tapia para conseguir los mismos resultados.

Fotografía 8.2.2-1: Aparatología para la extracción de una muestra geométrica



Fotografía 8.2.2-2: Extracción de una muestra geométrica



Fotografía 8.2.2-3: Disgregación de la tapia



Fotografía 8.2.2-4: Resultado fallido de extracción



Nosotros hemos optado por realizar un ensayo alternativo, valorando la humedad de la tapia y, a partir de los datos del ensayo Proctor modificado anterior, suponer la densidad seca de la tapia.

8.3. ENSAYO DE COMPACTACIÓN. PROCTOR INDIRECTO

8.3.1. OBJETIVO

Determinar la humedad real de la tapia y, de forma indirecta, su densidad seca.

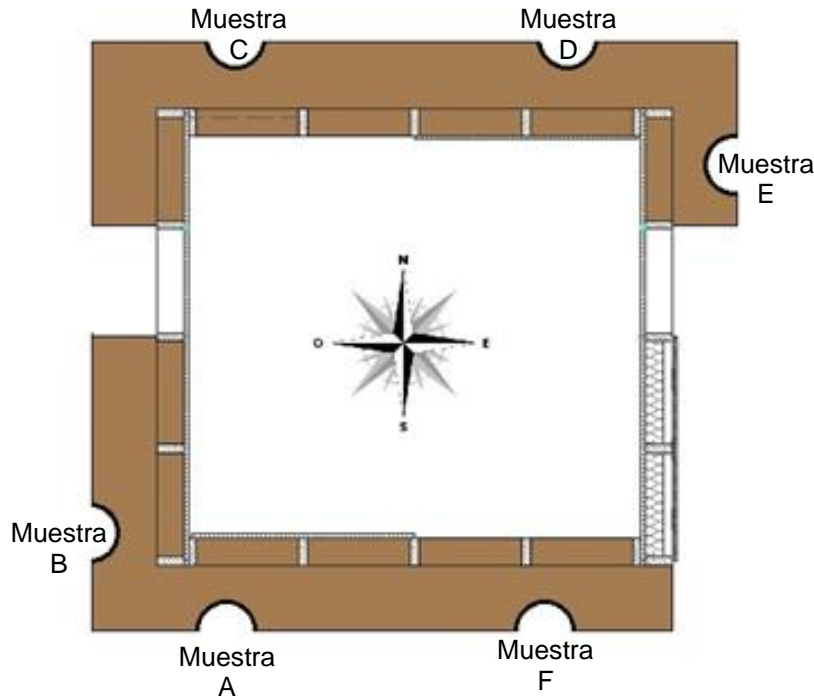
8.3.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación pertenecen, en parte, al Proyecto Final de Grado *Informe de las propiedades físicas y mecánicas de la casa S-Low* debido a que para poder realizar el seguimiento de obra del prototipo tuvieron que determinar qué tipo de tierra era la óptima para su proyecto. Se decidió realizar este ensayo ya que el ensayo anterior no aportó ningún dato y porque el ensayo que se utiliza para conocer la densidad del suelo en carreteras, método del densímetro nuclear, sólo se puede aplicar en paramentos horizontales y nuestra estructura de tapia es en vertical.

8.3.3. PROCESO

El ensayo consiste en extraer una muestra representativa, que como mínimo sea de 100g, del interior de cada tipología de tapia y orientación para analizar la humedad de la tierra de compactación. Antes de extraer una muestra se analizará la humedad de la tapia con un higrómetro. El ensayo se realizó el día viernes 3 de mayo.

Esquema 8.3.3-1: Ubicación extracción de las muestras



Fotografía 8.3.3-2: Extracción muestra



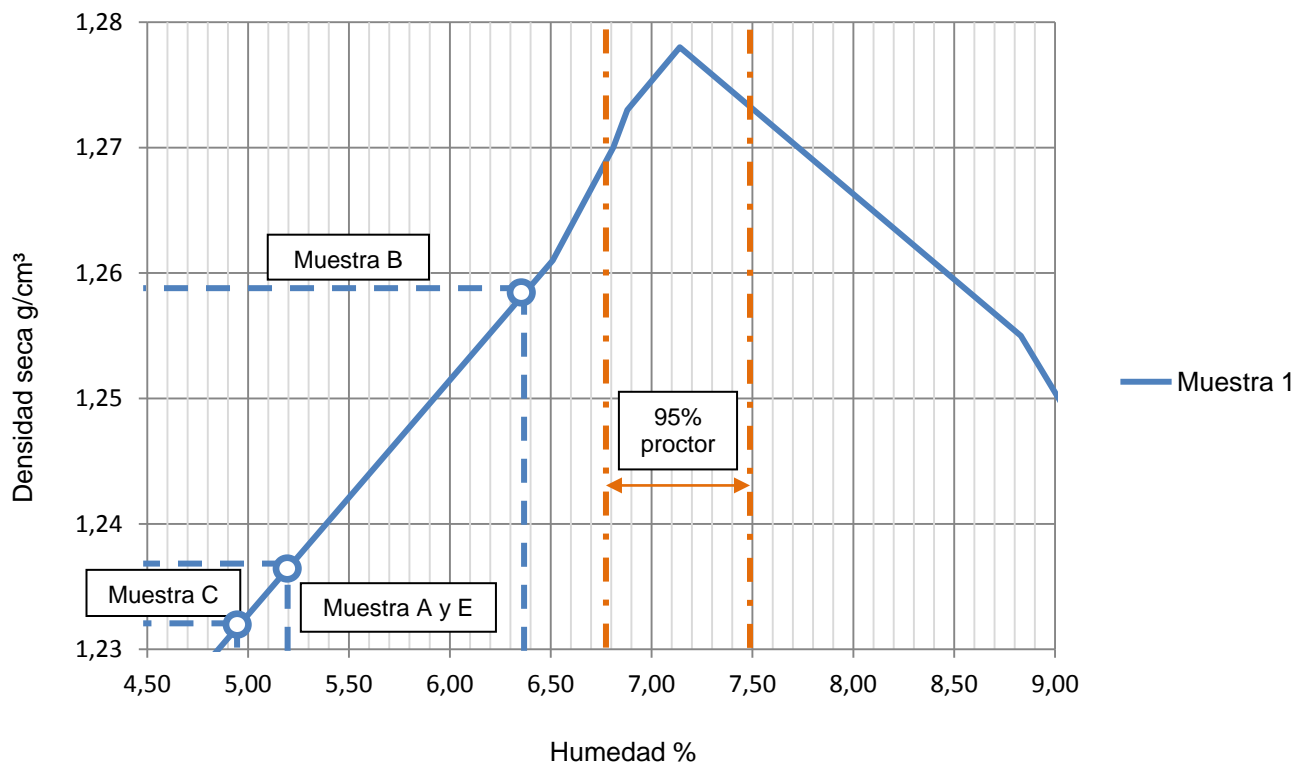
8.3.3. RESULTADOS

Tabla 8.3.3-3: Resultados de las humedades obtenidas de las muestras analizadas

Zona	A	B	C	D	E	F
Orientación	Sur	Oeste	Norte	Norte	Este	Sur
Referencia tara (g)	76,78g	108,56g	74,36g	115,60g	100,96g	83,02g
Tara+Tierra+Agua (g)	117,67g	244,06g	185,95g	239,51g	224,75g	190,87g
Tara+Tierra (g)	172,67g	235,92g	180,67g	233,92g	218,61g	182,60g
Tara (g)	76,78g	108,56g	74,36g	115,60g	100,96g	83,02g
Tierra (g)	95,89g	127,36g	106,31g	118,32g	117,65g	99,58g
Agua (g)	5,00g	8,14g	5,28g	5,59g	6,14g	8,27g
Humedad (%)	5,21%	6,39%	4,97%	4,72%	5,22%	8,30%

Zona	A	B	C	D	E	F
Datos Higrómetro	72,40%	76,40%	70,60%	49,00%	36,80%	31,00%
Hora ensayo	13:30h	11:34h	12:34h	12:50h	13:15h	13:10h

Gráfica 8.3.3-4: Relación entre la humedad y la densidad indirecta para tapia sin estabilizar



Gráfica 8.3.3-5: Relación entre la humedad y la densidad indirecta para la tapia sin estabilizar

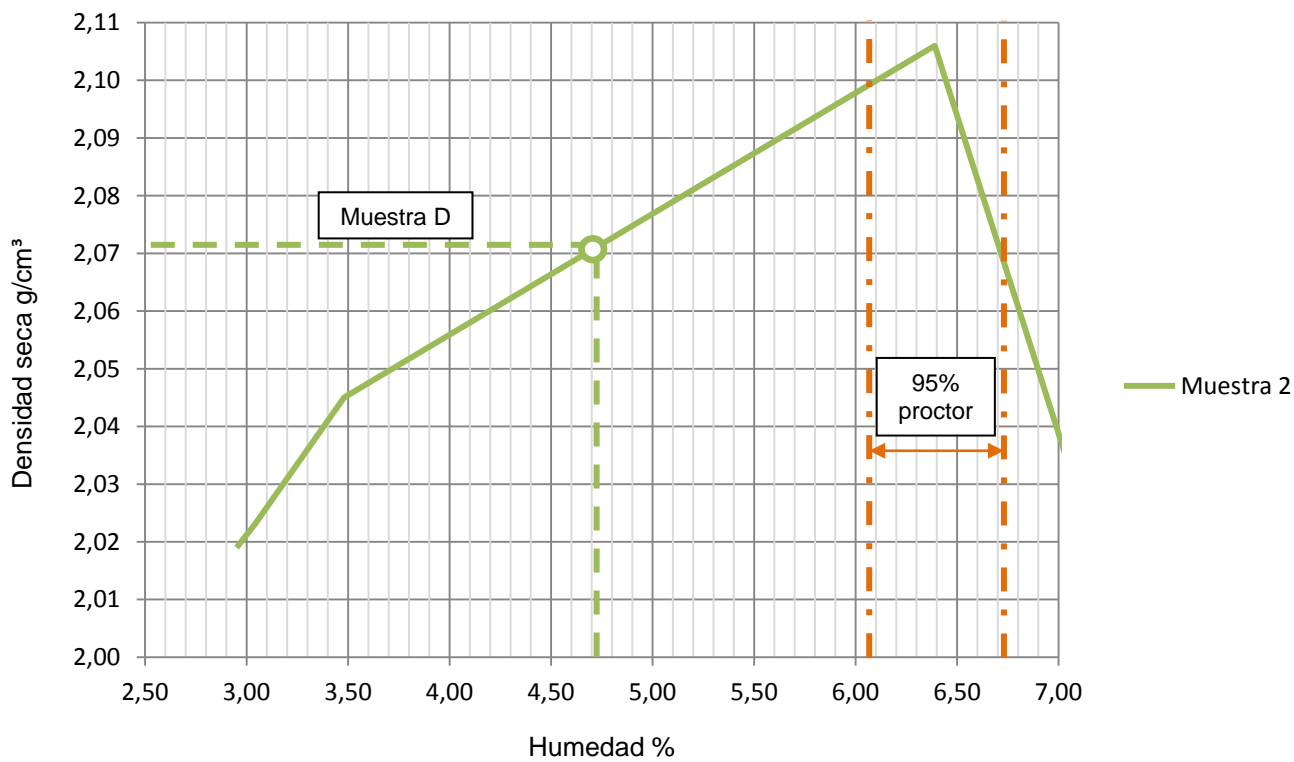


Tabla 8.3.3-6: Resultados obtenidos del ensayo

Zona	A	B	C	D	E	F
Densidad seca (g/cm ³)	1,236 g/cm ³	1,261 g/cm ³	1,233 g/cm ³	2,071 g/cm ³	1,236 g/cm ³	-
Humedad %	5,21%	6,39%	4,97%	4,72%	5,22%	8,30%
% Proctor	72,97%	89,50%	69,61%	73,75%	73,11%	-

A partir de los datos de las gráficas 8.3.3-4 y 8.3.3-5, y de la tabla 8.3.3-6; podemos ver que la densidad deducida en cualquiera de los muros de tapia no está dentro del 95% proctor, que era el dato que buscábamos, sino que está muy por debajo de esta variación. Estos datos pueden explicarse debido a que el ensayo se realizó un mes después de finalizar la construcción de la tapia y ésta ya había empezado su proceso natural de secado. La tapia, como es un material que respira y regula su humedad, produce retracciones por secado en el prototipo que no podemos cuantificar, ya que no han sido estudiadas en este trabajo, pero sí podemos decir que la aparición de fisuras en el prototipo son debidas a las retracciones producidas por la evaporación del agua de amasado y que han ido apareciendo después de la construcción.

También podemos observar que la densidad seca del muro estabilizado con arlita es superior al no estabilizado, por lo que su densidad deducida también es superior. Este fenómeno lo explicamos debido a que la arlita de 8 a 10mm de diámetro es más porosa y frágil que la de 3 a 8mm de diámetro y al tapiar se fragmentaba, cosa que podría ayudar a conseguir una mejor compactación de la tapia. Este hecho se puede demostrar volviendo a realizar el ensayo granulométrico de suelo por tamizado cogiendo una muestra representativa de tierra con arlita fragmentada y comparar los datos con los obtenidos anteriormente. Este proceso no forma parte de este proyecto sino de otro Proyecto Final de Grado posterior realizado por Laura Gaspar.

No podemos conocer la densidad deducida del muro estabilizado con cemento ya que el cálculo de tierra estimado para la construcción fue exacto y no sobró material suficiente para realizar el ensayo proctor por lo que no podemos comparar el dato obtenido. Lo que sí podemos deducir es el porqué de su alto grado de humedad, nosotros necesitamos incorporar más agua, que en el resto de la preparación de las tierras, durante la mezcla de tierra y cemento debido a que el cemento absorbía parte de agua de amasado, por este motivo comprobamos que su humedad es mayor a la del resto.

Los datos del higrómetro se han cogido con la finalidad de poder comparar los diferentes ensayos que se realicen en la tapia, es decir, poder ver la variación de humedad de la tapia en función del tiempo y de los ensayos realizados. De esta forma podremos saber cuál es la humedad aproximada de la tapia, en porcentaje, y poder comparar los ensayos entre sí.

8.4. ENSAYO CON TUBO KARSTEN

8.4.1. OBJETIVO

Conocer la velocidad de absorción de agua que tiene el paramento a analizar.

8.4.2. OBSERVACIONES

El ensayo no está normalizado por lo que hay diferentes opiniones sobre la mejor forma de ejecutar la realización de este ensayo. Nosotros, junto al los proyectos *Estudi de revestiments amb fibres vegetals* [7] y *Revestimiento en tapia* [8], hemos estado consultado a diferentes autores que opinan sobre las variaciones del ensayo y hemos realizado algunos cambios respecto a la versión original.

8.4.3. PROCESO

Los materiales y procedimientos utilizados para la realización de este ensayo se encuentran detallados en el artículo *El tubo Karsten* [9], y la metodología adoptada consiste en utilizar papel de poros para sellar la boca

circular que conecta el tubo Karsten con el paramento para evitar la disgregación de la tierra que esté en contacto con el agua.

Además se ha llenado el tubo hasta la cota 0ml y cada vez que el volumen de agua descendía un 1ml se volvía a rellenar hasta la cota 0ml para poder ensayar el paramento con una presión de agua más o menos constante que corresponde al efecto de una lluvia acompañada de vientos cuya velocidad es de 100km/h. El ensayo se ha realizado en tres zonas diferentes, para poder analizar el comportamiento de las diferentes construcciones de tapia.

Fotografía 8.4.3-1: Ubicación de los tubo Karsten, para la tapia estabilizada con cemento



Fotografía 8.4.3-2: Ubicación de los tubo Karsten, para la tapia sin estabilizar



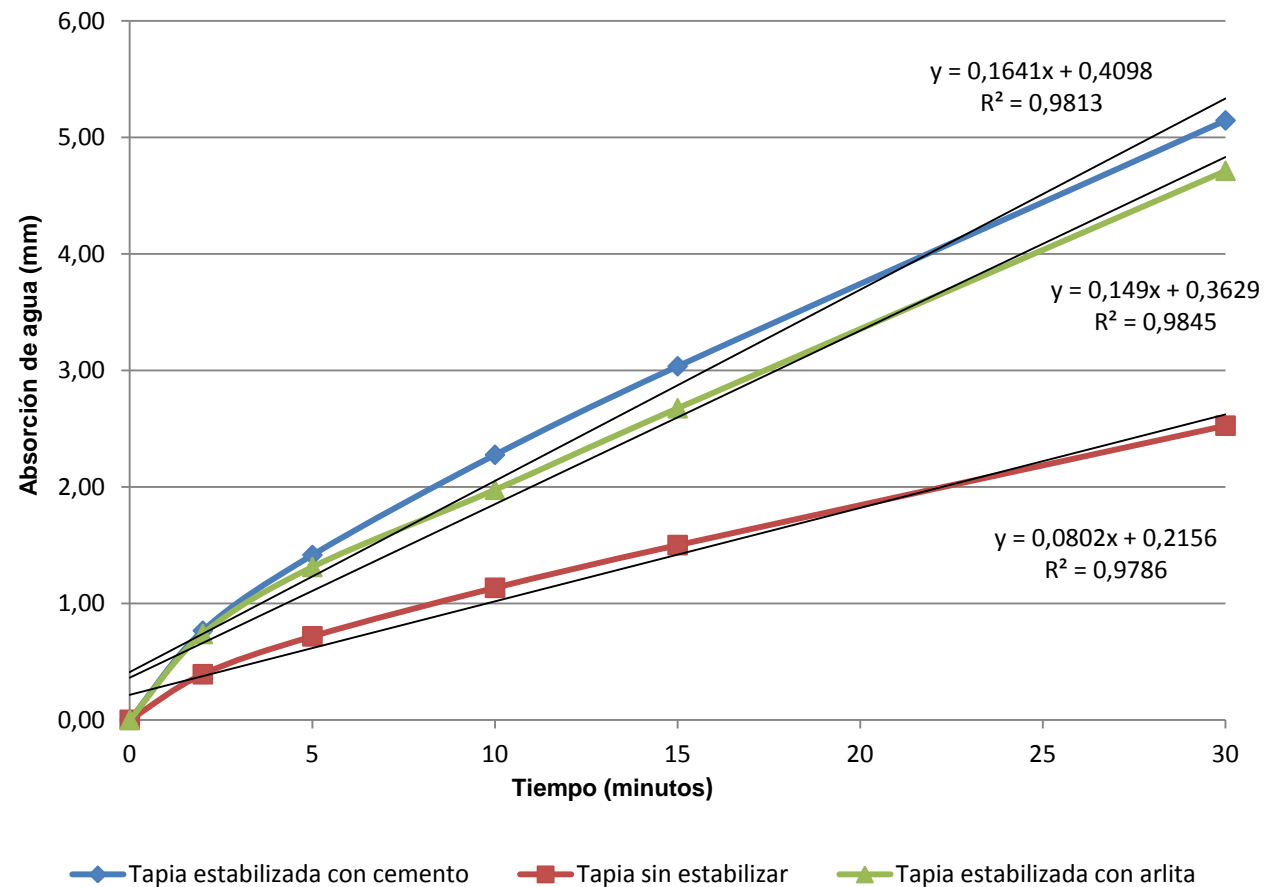
Fotografía 8.4.3-3: Ubicación de los tubo Karsten, para la tapia estabilizada con arlita



Los ensayos se han realizado 10 veces, 5 veces a primera hora de la mañana y 5 veces por la tarde, para poder comparar los datos. La distribución de los tubos Karsten se ha realizado tal y como se muestra en las fotografías 8.4.3-1, 8.4.3-2 y 8.4.3-3. Para ensayar en dos periodos de tiempo diferentes se ha modificado ligeramente la ubicación pero siguiendo el orden y la posición explicada en la fotografías anteriores.

8.4.4. RESULTADOS

Tabla 8.4.4-1: Resultados del ensayo tubo Karsten para cada tipo de tapia estabilizada



A partir de la gráfica 8.4.3-4, podemos observar que la tapia estabilizada con cemento es la que tiene mayor velocidad de absorción de agua, llegando a absorber 5,15mm en 30 minutos, respecto a la tapia estabilizada con arlita o a la tapia no estabilizada.

Las dos tapias estabilizadas tienen un crecimiento inicial parecido, en los primeros 5 minutos su velocidad de absorción es casi el doble que la de tierra sin estabilizar. A partir de los 5 minutos aumenta ligeramente la velocidad de absorción de la tierra estabilizada con cemento y se mantienen en paralelo las dos velocidades. Esto quiere decir que inicialmente la tierra estabilizada con cemento tiene una velocidad de absorción mayor pero que al estabilizarse, aproximadamente a los 10 minutos de haber empezado el ensayo, las dos tienen un comportamiento similar.

Este fenómeno se explica por un lado porque la tapia estabilizada con arlita, según la clasificación unificada de Casagrande, es un suelo granular que implica una permeabilidad mayor que la de un suelo cohesivo; y por otro lado porque la tapia estabilizada con cemento, al tener cemento en su cara exterior, absorbe más agua que si tuviera el estabilizante en su interior, ya que al endurecerse este genera microfisuras.

La tapia sin estabilizar es la que tiene una velocidad de absorción de agua menor, llegando a absorber 2,53mm en 30 minutos, que es la mitad de lo que absorben las tapias estabilizadas. Estos datos también son explicables a partir de la clasificación unificada de Casagrande, ya que al tener un suelo cohesivo la permeabilidad de ésta es más baja.

8.5. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REBOTE. MARTILLO SCHMIDT

8.5.1. OBJETIVO

Conocer la resistencia del material a partir de un ensayo no destructivo que nos aporta como dato el índice de rebote.

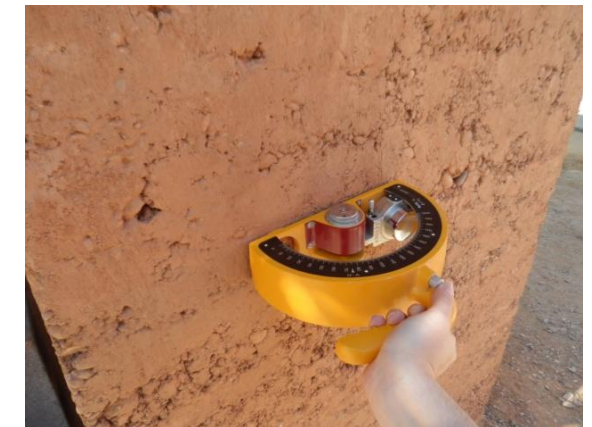
8.5.2. PROCESO

El ensayo se realiza utilizando el martillo Schmidt en paralelo a los muros construidos y situando el aparato tanto en perpendicular como en paralelo al suelo, fotografías 8.5.2-1 y fotografía 8.5.2-2. Para que los datos obtenidos sean representativos, se realizan varias tomas de datos en un mismo punto, hasta conseguir un valor medio, y en diferentes lugares del muro.

Fotografía 8.5.2-1: Martillo Schmidt vertical



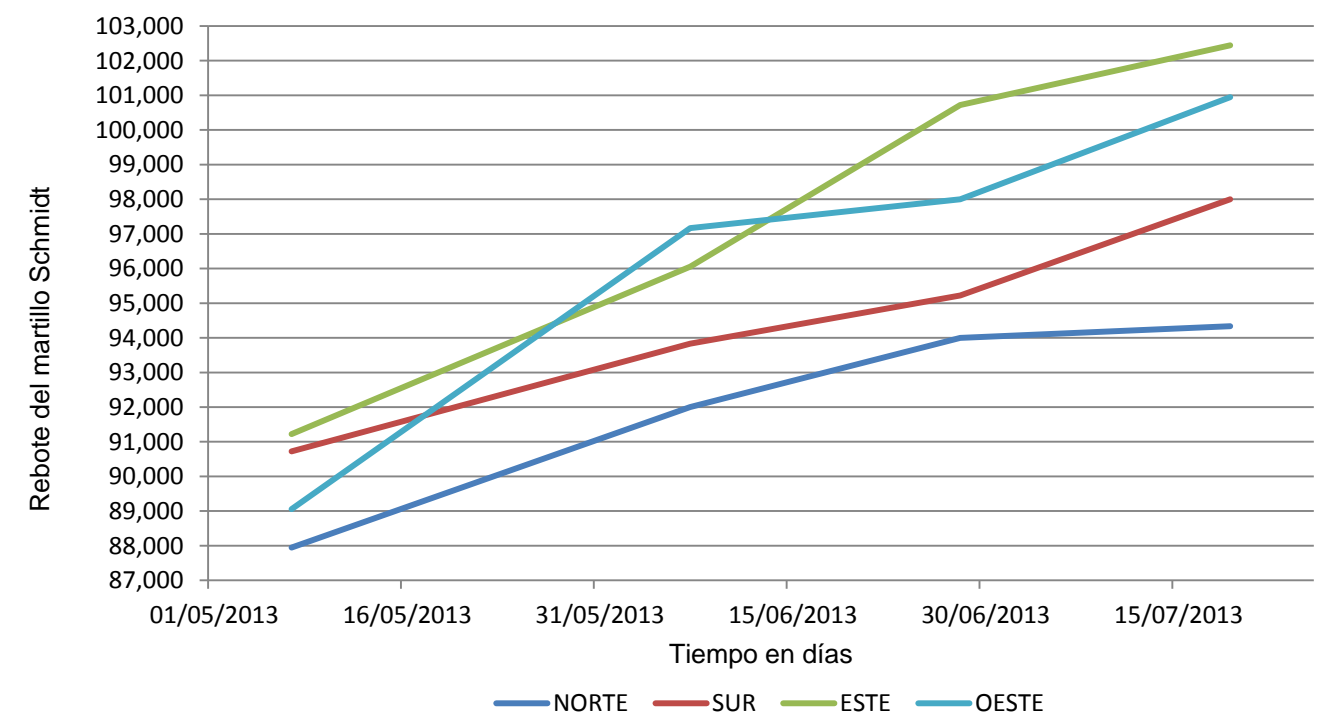
Fotografía 8.5.2-2: Martillo Schmidt horizontal



8.5.3. RESULTADOS

Se ha realizado el ensayo diferentes días para observar si existe variación del índice de rebote a lo largo del tiempo. Los datos expresados en las gráficas siguientes relacionan cada una de las orientaciones con el comportamiento de la tapia sin estabilizar.

Gráfica 8.5.3-1: Datos medios del martillo Schmidt para cada orientación



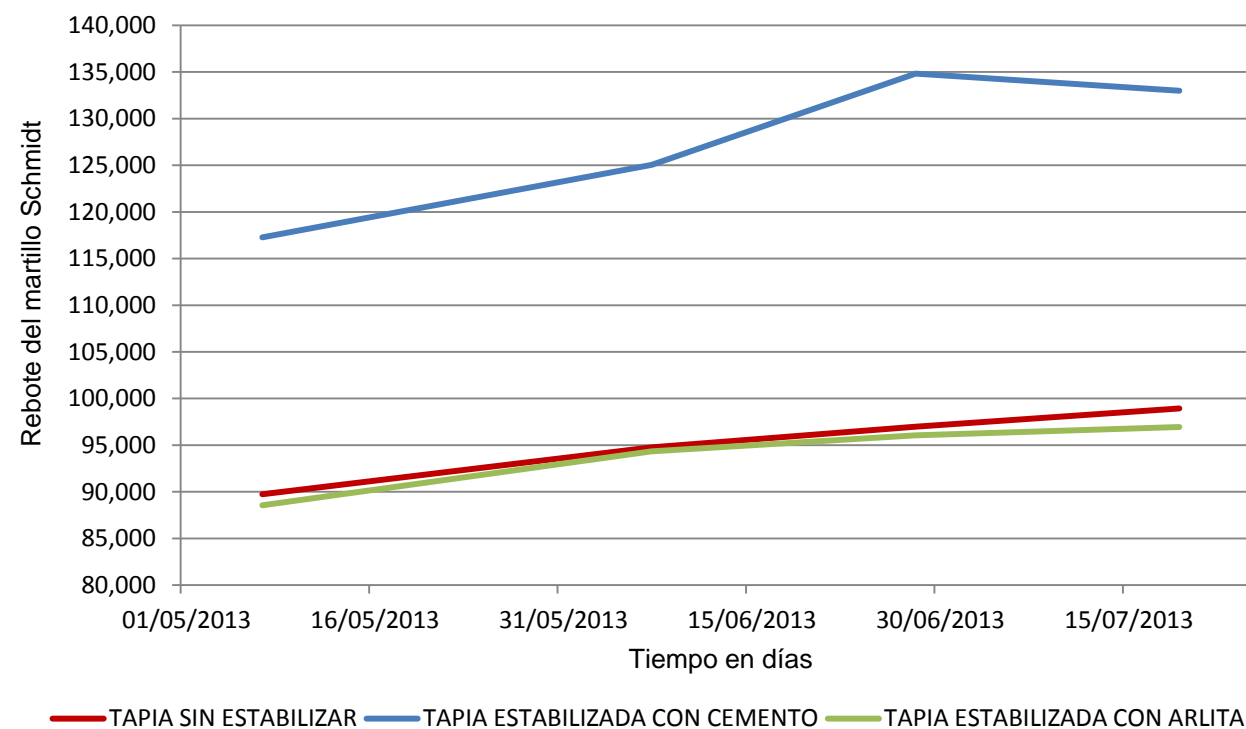
En la gráfica 8.5.3-1, podemos ver la comparativa de la tapia sin estabilizar con sus diferentes orientaciones en el prototipo. Podemos ver que los valores son muy parecidos y que todos siguen la misma tendencia ascendente durante los periodos de ensayo.

Podemos ver que la que aporta valores de índice de rebote más elevados es la tapia orientada a Este, que desde que se toman lecturas es la que tiene valores más altos, de media, por lo que puede ser debido a la compactación durante el proceso de tapiado. Podría ser éste el factor determinante ya que es un lugar más pequeño y estrecho que el resto y necesitaba más atenciones en el momento de la construcción, por lo que es probable que se ejerciera más presión con el pisón por miedo a no compactar lo suficiente en un lugar poco accesible.

El resto de valores los podemos relacionar con su proceso de construcción, la construcción se realizó siguiendo las agujas del reloj partiendo de Sur y acabando en Sur nuevamente, por lo que la tapia construida en la orientación Sur tiene un valor más alto inicialmente ya que hace más tiempo que fue construida, seguidamente viene la tapia construida en orientación Oeste y por último la tapia en orientación Norte.

Podría ser que el agua de amasado al evaporarse ayudara a asentar la construcción y por este motivo aumentara ligeramente su índice de rebote pero no es algo que hubiéramos previsto estudiar por lo que simplemente es una hipótesis, pero los valores de aumento progresivo nos llevan a pensar en esta posibilidad ya que todas las orientaciones crecen ligeramente menos la Norte que se estanca y esto podría ser debido a la evaporación más lenta del agua de amasado. Lo que sí sabemos, mediante la comprobación de humedad con el higrómetro, que existe una diferencia de humedades entre la tapia Norte y la tapia Sur. Mientras que la tapia Sur tiene unos valores medios de 21,5% de humedad, la tapia Norte tiene como valores medios 24,9%.

Gráfica 8.5.3-2: Media del martillo Schmidt para cada cerramiento



Podemos ver claramente que existe una gran diferencia entre el índice de rebote de la tapia estabilizada con cemento en contraposición con la tapia sin estabilizar y la tapia estabilizada con arlita. Estos valores serían muy interesantes compararlos con la resistencia a compresión de las tapias, que se realizará más adelante, aunque no se dispone de una muestra ensayable para la tapia estabilizada con cemento.

Durante la realización periódica del ensayo, el martillo Schmidt del laboratorio de materiales se estropeó por lo que sólo disponemos de los datos de las gráficas anteriores, nos habría gustado realzar el seguimiento hasta finales de octubre.

9. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE TAPIA

En paralelo a la construcción del prototipo se realizaron unas probetas de 0,30m de ancho, 0,50m de profundidad y 0,3m de altura. Sus dimensiones fueron el primer problema que se nos planteó en el proyecto, ya que buscábamos un volumen que pudiera ensayarse en el laboratorio de materiales pero que no perdiera la magnitud del prototipo para poder extrapolar los resultados de ambas construcciones.

Llegamos a la conclusión que la profundidad ideal eran 0,50m debido a que la tapia del prototipo, en su mayor espesor, es de este grosor; el resto fue el sentido común ya que el peso estimado de las probetas es de entre 80 y 100kg cada una, cosa que dificulta su movilidad.

Una vez construidas fuera, con la ayuda de Luís Allepuz y Cristian Poza, se transportaron las probetas al interior de uno de los dos laboratorios de materiales, donde se acopiaron.

Desde el Laboratorio de Materiales, Antonia Navarro, propuso la creación de un encofrado con ruedas que permitiera la movilidad de las probetas permitiendo ensayar las probetas, con los ensayos que se explican a continuación, y transportarlas tanto por el laboratorio como de un laboratorio a otro.

Fotografía 9-1: Probeta acopiada en obra



Fotografía 9-3: Probeta en fase de aislamiento



Fotografía 9-2: Probeta acopiada en laboratorio






Fotografía 9-4: Probeta encofrada sobre ruedas



Se construyeron 6 probetas, de las cuales solo 5 han podido ser ensayadas. A continuación, en la tabla 9-5, se especifican las características de cada una de ellas.

Fotografía 9-5: Características de las diferentes probetas a analizar

Nombre Probeta	Características	
T.1.	Probeta de tapia sin estabilizar.	
	Fotografía 9-6: Construcción	Fotografía 9-7: Acopio laboratorio
T.2.	Probeta de tapia sin estabilizar.	
	Fotografía 9-8: Construcción	Fotografía 9-9: Acopio laboratorio
A.1.	Probeta estabilizada con arlita, arlita de diámetro de 3 a 8mm.	
	Fotografía 9-10: Construcción	Fotografía 9-11: Acopio laboratorio

A.2.	<p>Probeta estabilizada con arlita, arlita de diámetro de 3 a 8mm y de 8 a 10mm.</p> <div><div>Fotografía 9-12: Construcción</div><div></div></div> <div><div>Fotografía 9-13: Acopio laboratorio</div><div></div></div>
A.3.	<p>Probeta estabilizada con arlita, arlita de diámetro de 3 a 8mm y de 8 a 10mm.</p> <div><div>Fotografía 9-14: Construcción</div><div></div></div> <div><div>Fotografía 9-15: Acopio laboratorio</div><div></div></div>
A.4.	<p>Probeta estabilizada con arlita, en este caso la arlita utilizada es únicamente de 8 a 10mm de diámetro situada en el interior. El problema de esta probeta es la falta de aglutinante, debido a la baja presencia de arcilla en la zona de arlita, que produjo la rotura de la probeta durante su transporte al laboratorio.</p> <div><div>Fotografía 9-16: Construcción</div><div></div></div> <div><div>Fotografía 9-17: Acopio laboratorio</div><div></div></div>

El estudio de las características de las probetas de tapia se realizó a partir de los siguientes ensayos:

- Ensayo para determinar la densidad del material.
- Ensayo del comportamiento térmico del material.
- Ensayo de propagación del sonido por un medio, mediante ultrasonidos.
- Ensayo de monitorización en verano.
- Ensayo de monitorización en invierno.
- Ensayo de resistencia a compresión.
- Determinación del índice de rebote. Martillo Schmidt.

Cuando se realizó la propuesta para este proyecto también se incluyó el estudio del comportamiento frente al fuego de este material. Durante el planteamiento del proyecto se propuso generar una rampa de temperaturas, donde ensayar la reacción de una probeta frente al fuego, pero obviamente las dimensiones de las probetas han imposibilitado este tipo de ensayo.

También se incluyó el estudio en cuanto a la permeabilidad al agua, pero era necesario realizar unas probetas más pequeñas para este ensayo. Puesto que existe otro Proyecto Final de Grado, denominado *Estudi de revestiments amb fibres vegetals* [7], que utilizando la misma tierra que nosotros ya ha realizado este ensayo, nosotros no lo hemos repetido.

9.1. ENSAYO DE PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL MATERIAL.

9.1.1. OBJETIVO

Determinar la densidad aparente de las probetas.

9.1.2. PROCESO

Este ensayo consiste en obtener una muestra geométrica, cúbica o circular, de la que se pueda determinar su volumen. Una vez tengamos el volumen, calculado matemáticamente, solo necesitamos conocer su peso y obtendremos la densidad aparente de la muestra.

9.1.3. RESULTADOS

No hemos podido obtener ningún resultado de este ensayo. Para poder obtener una muestra geométrica representativa de las probetas hay que extraer una porción, ya que no es posible pesar la probeta original debido a su volumen y su peso. Pero durante el proceso no se ha conseguido extraer una muestra lo suficientemente uniforme ni estable para realizar el ensayo; se obtenían muestras muy irregulares, que se fragmentaban perdiendo parte de sus componentes en el momento de su manipulación.

9.2. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL MATERIAL.

9.2.1. OBJETIVO

Determinar el comportamiento térmico de las probetas a partir de los datos obtenidos con el aparato *Thermal properties analyzer, Quickline™* -30.

9.2.2. PROCESO

Este ensayo consiste en utilizar un analizador de propiedades térmicas que nos proporciona para cada probeta analizada la conductividad térmica y la difusión térmica del cerramiento analizado. El ensayo se realiza 3 veces, en cada muestra, para poder obtener unos datos fiables y trabajaremos con la media de éstos. Compararemos los datos obtenidos con la normativa de aislamiento del Código Técnico y valoraremos la inercia térmica del material.

Tabla 9.2-1: Comportamiento térmico de los diferentes paramentos ensayados

	Conductividad térmica (λ)	Difusión térmica (α)
Paramento de tierra sin estabilizar	1,110 w/m·k	2,297 E-6 m²/s
Paramento de tierra estabilizada con arlita hasta 8mm de diámetro	1,329 w/m·k	2,647 E-6 m²/s
Paramento de tierra estabilizada con arlita hasta 10mm de diámetro	0,830 w/m·k	1,321 E-6 m²/s

A partir de estos datos podemos conocer la resistencia térmica y la transmitancia térmica de los paramentos analizados, tabla 9.2-2.

Tabla 9.2-2: Resistencia térmica y transmitancia térmica de los diferentes paramentos ensayados

	Resistencia térmica (R) $R = \frac{e}{\lambda}$	Transmitancia térmica (U) $U = \frac{1}{R}$
Paramento de tierra sin estabilizar	0,450 m²·k/w	2,221 w/ m²·k
Paramento de tierra estabilizada con arlita hasta 8mm de diámetro	0,376 m²·k/w	2,657 w/ m²·k
Paramento de tierra estabilizada con arlita hasta 10mm de diámetro	0,602 m²·k/w	1,660 w/ m²·k

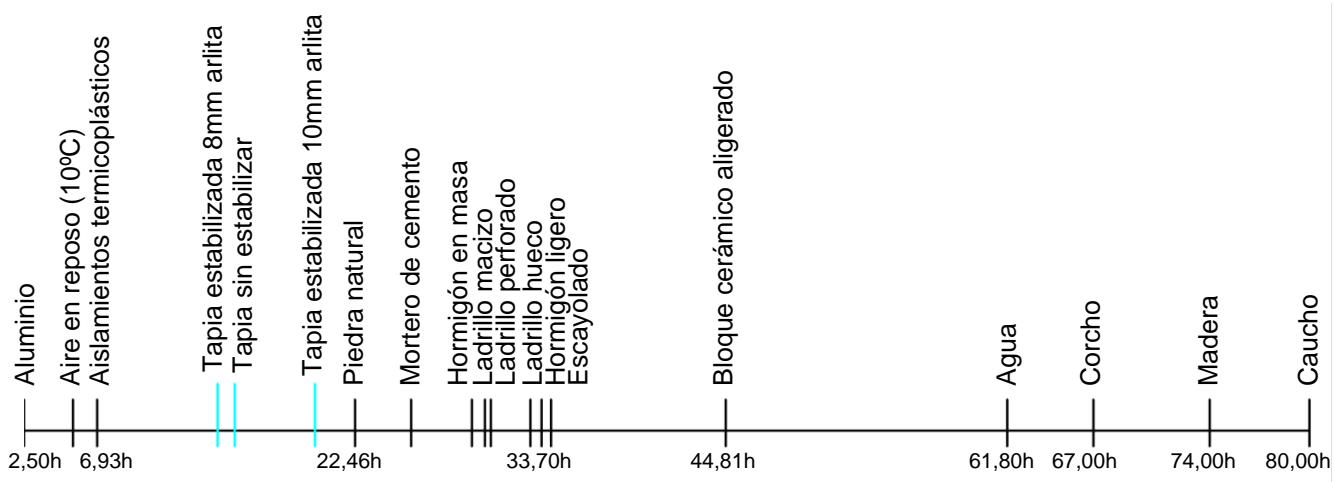
La inercia térmica del material no la podemos conocer, pero sí podemos saber el retardo térmico y el coeficiente de amortiguamiento térmico de los paramentos analizados, tabla 9.2-3.

Tabla 9.2-3: Retardo y coeficiente de amortiguamiento térmico de los diferentes paramentos ensayados

	Retardo térmico (R _t) $R_t = \frac{1,382 \times L}{\sqrt{\alpha}}$	Amortiguamiento termico (μ) $\mu = e^{\left(\frac{-0,362}{\sqrt{\alpha}} \times L\right)}$
Paramento de tierra sin estabilizar	7,60 h	0,137
Paramento de tierra estabilizada con arlita hasta 8mm de diámetro	7,08 h	0,157
Paramento de tierra estabilizada con arlita hasta 10mm de diámetro	10,02 h	0,07

Si representamos como una onda sinusoidal la fluctuación térmica en el exterior de un paramento y con otra cómo se trasmite el calor a través de él, el retardo térmico de un material es el desfase, en tiempo, de las dos ondas. En la gráfica 9.2-4 podemos ver una comparativa de materiales frente al nuestro.

Gráfica 9.2-4: Retardo térmico de diferentes materiales



9.2.3. RESULTADOS

La conductividad térmica de un material nos indica como de aislante puede ser nuestro paramento, cuanto más nos acerquemos a 0 w/m·k menor conductor del calor será. En nuestro caso podemos ver que de los tres paramentos diferentes el que está estabilizado con arlita, con una granulometría hasta 10mm de diámetro y con un porcentaje total del 40,18%, es más aislante que los otros dos. Pero también observamos que entre estabilizar con un porcentaje bajo de arlita, 12,2%, y no estabilizar la tierra; tiene un mejor comportamiento térmico la tierra sin estabilizar.

Según el Código Técnico, las viviendas de nueva construcción deben cumplir una serie de requisitos térmicos según la zona climática en invierno, que se recogen en el DB HE Ahorro de energía y que están recopilados en la tabla 9.2.3-1. Los datos se han extraído de la nueva versión publicada en el BOE el día 12/09/2013 ya que son más restrictivos que en la publicación anterior.

En nuestro caso nos encontramos en una zona climática tipo B2, que corresponde a Barcelona capital, también según los datos de Código Técnico de la edificación.

Tabla 9.2.3-1: Transmitancias térmicas “U” máximas, en diferentes casos, según el CTE

Parámetros	U
Muros y elementos en contacto con el terreno	1,00 w/ m²·k
Particiones interiores horizontales y verticales que delimiten unidades de uso distinto	1,10 w/ m²·k
Particiones interiores verticales que delimiten unidades del mismo uso	1,20 w/ m²·k

Como podemos observar en los valores de la normativa, no cumplimos con los valores máximos de la transmitancia térmica del paramento. El que más se aproxima es el paramento de tierra estabilizado con arlita, hasta 10mm de diámetro pero igualmente está fuera del máximo marcado por la normativa.

Para poder llegar a cumplir con los parámetros máximos que impone el Código Técnico tendríamos dos opciones. La primera sería aumentar el grosor del muro, que actualmente es de 0,50m de espesor, hasta conseguir una transmitancia inferior o igual a 1,00 w/ m²·k:

- Para el paramento de tierra sin estabilizar necesitaríamos construir un muro de 1,12m de espesor.
- Para el paramento estabilizado con arlita, hasta 8mm de diámetro, necesitaríamos construir un muro de 1,33m de espesor.
- Para el paramento estabilizado con arlita, hasta 10mm de diámetro, necesitaríamos construir un muro de 0,84m de espesor.

En cualquiera de los tres casos, no es viable la construcción de muros tan grandes por lo que descartamos aumentar el grosor del muro para cumplir normativa. La segunda solución es incorporar al cerramiento un aislamiento, que nos ayude a cumplir los requisitos del Código Técnico, idea que ya nos propone Gernot Minke [4] en su libro.

Como ya hemos comentado anteriormente, la inercia no la podemos calcular ya que no disponemos ni de la densidad del material ni del calor específico de éste, pero sí podemos conocer el retardo térmico y el coeficiente de amortiguamiento térmico de nuestros paramentos que son datos que nos ayudarán a valorar la inercia que tenemos.

El retardo térmico es el desfase entre dos ondas sinusoidales que representan la temperatura exterior del paramento que intenta propagarse al interior y la propagación de esa onda por el interior del paramento, cuanto mayor sea ese desfase la capacidad térmica del material será mayor, es decir, que la cantidad de calor necesaria para variar la temperatura de un cuerpo tendrá que ser mayor. En nuestro caso, como podemos ver en la tabla 9.2-3, tenemos un retardo térmico bajo en comparación con materiales que utilizamos como aislamientos. Lo que también podemos ver es que la tapia estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, necesita más cantidad de calor para variar su temperatura que los otros dos paramentos, aproximadamente un 25% más.

El coeficiente de amortiguamiento térmico es la relación entre la variación de temperaturas exteriores y la variación de temperaturas interiores, obteniendo un valor sin unidades que oscilará entre “0” y “1”. Si nuestro valor es “0”, quiere decir que tenemos una temperatura constante en el interior del paramento, en cambio si el valor es “1”, quiere decir que la temperatura exterior y la temperatura interior son iguales.

En nuestro caso, tenemos valores muy cercanos a “0” por lo que existe una variación pequeña de temperaturas en el interior del paramento, siendo el cerramiento de tapia estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, el que tiene una variación menor.

Este último dato es muy interesante ya que podemos intuir que las temperaturas del prototipo deberían ser estables en su interior, evitando las grandes fluctuaciones de temperatura siempre que esté bien aislado del exterior.

9.3. ENSAYO DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO POR UN MEDIO, MEDIANTE ULTRASONIDOS.

9.3.1. OBJETIVO

Determinar la velocidad de propagación del sonido por un medio.

9.3.2. OBSERVACIONES

Inicialmente se intentó desarrollar el ensayo colocando un sensor a cada lado de la probeta, la distancia máxima entre los dos cabezales es de 50cm, pero no se obtenía lectura alguna y en algunos momentos parecía obtener lectura pero la perdía rápidamente. Este dato es importante ya que demuestra la porosidad e irregularidad del material, que de otra forma ya suponíamos.

9.3.3. PROCESO

Este ensayo consiste en utilizar un aparato que funciona como emisor y receptor de ondas supersónicas a través de un material para encontrar la velocidad máxima de propagación del sonido. El ensayo se ha desarrollado colocando dos cabezales en la misma cara de la probeta y separándolos una distancia conocida.

Gráfica 9.3.3-1: Preparación toma de datos



Gráfica 9.3.3-2: Preparación toma de datos



9.3.4. RESULTADOS

Tabla 9.3.4-1: Resultados del ensayo con ultrasonidos

	Media distancia	Media Tiempo	Velocidad
Paramento de tierra sin estabilizar	0,11 m	4,18 E-5 s	391,98 m/s
Paramento de tierra estabilizada con arlita hasta 8mm de diámetro	0,16 m	3,90 E-4 s	513,94 m/s
Paramento de tierra estabilizada con arlita hasta 10mm de diámetro	0,17 m	3,35 E-4 s	444,32 m/s

A partir de los datos de la tabla 9.3.4-1, podemos ver que la velocidad de propagación del sonido por el cerramiento es elevada. Esto es debido a la granulometría del conjunto que demuestra su alta porosidad pese a la compactación que se realizada durante el proceso de tapiado.

El otro dato que podemos observar es que las tapias estabilizadas con arlita tienen una velocidad de propagación superior o lo que es lo mismo, aumentan la porosidad del conjunto.

El dato significativo de este ensayo es que se esperaba que al aumentar el porcentaje de arlita, también aumentara la porosidad del cerramiento y la velocidad de propagación. Pero lo que vemos en la tabla es que es más porosa la tapia con arlita de hasta 8mm de diámetro, que la tapia con arlita de hasta 10mm de diámetro. Este dato inesperado lo podemos explicar teniendo presente lo sucedido durante la construcción, ya que cuando se tapiaba con arlita, hasta 10mm de diámetro, se fragmentaba porque es más frágil que la arlita, hasta 8mm de diámetro, y este fenómeno puede haber influido en la porosidad del material, haciendo que tengamos más cantidad de arlita, beneficiándonos de sus propiedades térmicas, pero que disminuyamos su porosidad.

9.4. ENSAYO DE MONITORIZACIÓN DE LAS PROBETAS. SIMULACIÓN VERANO.

9.4.1. OBJETIVO

Determinar el comportamiento que tienen las probetas frente a los incrementos de temperatura en el exterior del paramento, intentando reproducir una situación real en verano con la ayuda de un horno.

9.4.2. PROCESO

Los pasos a seguir para la realización del ensayo se detallan a continuación:

Aislar, lo mejor posible, las probetas que vamos a ensayar, exceptuando dos caras que consideramos la interior y la exterior del muro, para evitar la pérdida de calor una vez empiece el ensayo.

Fotografía 9.4.2-1: Aislamiento de probetas con poliestireno extruido



Fotografía 9.4.2-2: Aislamiento con poliestireno expandido



Colocar en todas y cada una de las caras de la probeta, 6 caras a controlar, así como en el interior del horno un sensor termopar tipo K conectado a un data logger que guardará los datos del ensayo cada 10 minutos hasta temperatura constante de las caras interior y exterior.

Fotografía 9.4.2-3: Colocaciones de sensores en horno



Fotografía 9.4.2-4: Colocación de sensores en probeta



Acoplar una de las caras de la probeta, que consideraremos la cara exterior del muro, a la boca de un horno, del cual podamos controlar su temperatura en este caso entre 55 y 60°C, y aislar todas las zonas que sean susceptibles de producir pérdida de calor del experimento. Es necesario controlar las condiciones de temperatura y humedad, por lo que colocaremos un data logger que nos controle las condiciones ambientales.

Fotografía 9.4.2-5: Vista, desde arriba, del aislamiento lateral e inferior del horno



Fotografía 9.4.2-6: Aislamiento del conjunto con los data logger para tomar datos



El ensayo tiene una duración de 45h, durante ese tiempo tomaremos datos de la temperatura cada 10 minutos. El ensayo tiene esta duración de tiempo ya que, con los experimentos iniciales que se hicieron, se consideró que era el tiempo óptimo para conseguir un equilibrio térmico entre la cara interior y la cara exterior de la probeta.

El motivo por el cual se coloca un sensor termopar en cada cara de la probeta es para determinar la pérdida de calor que pueda generarse por esa zona.

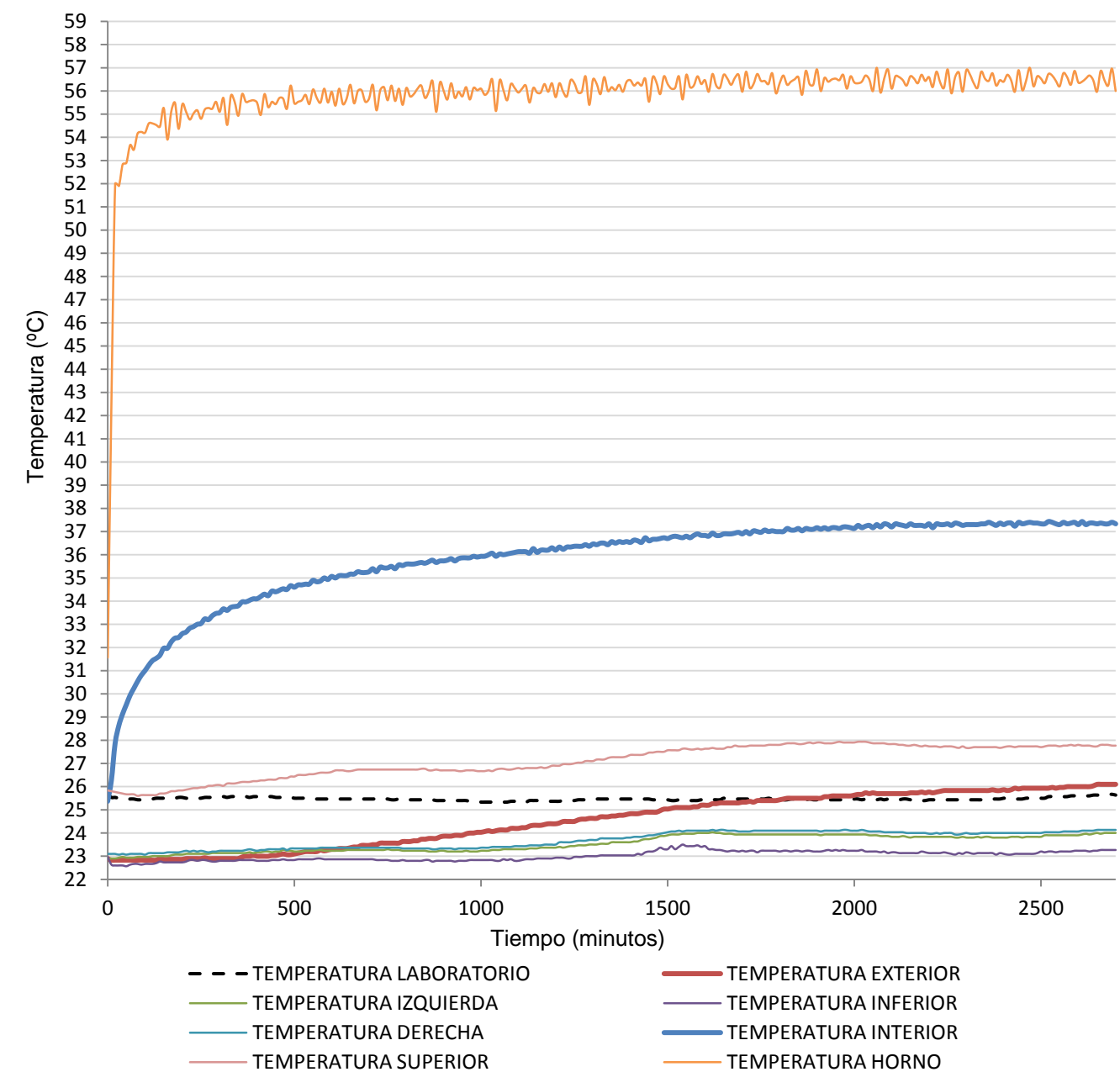
Nosotros hemos aislado las probetas mediante aislamiento de poliestireno extruido o de celulosa, y hemos rellenado los huecos con poliestireno expandido ya que las probetas no tenían las caras perfectamente rectas. Pero sabemos que este aislamiento no es suficiente para impedir el paso del calor, sería necesario mucho aislamiento para poder impedir la pérdida de calor y conseguir que el flujo de calor fuera lineal por lo que optamos por cuantificar la pérdida de calor durante el ensayo.

9.4.3. RESULTADOS

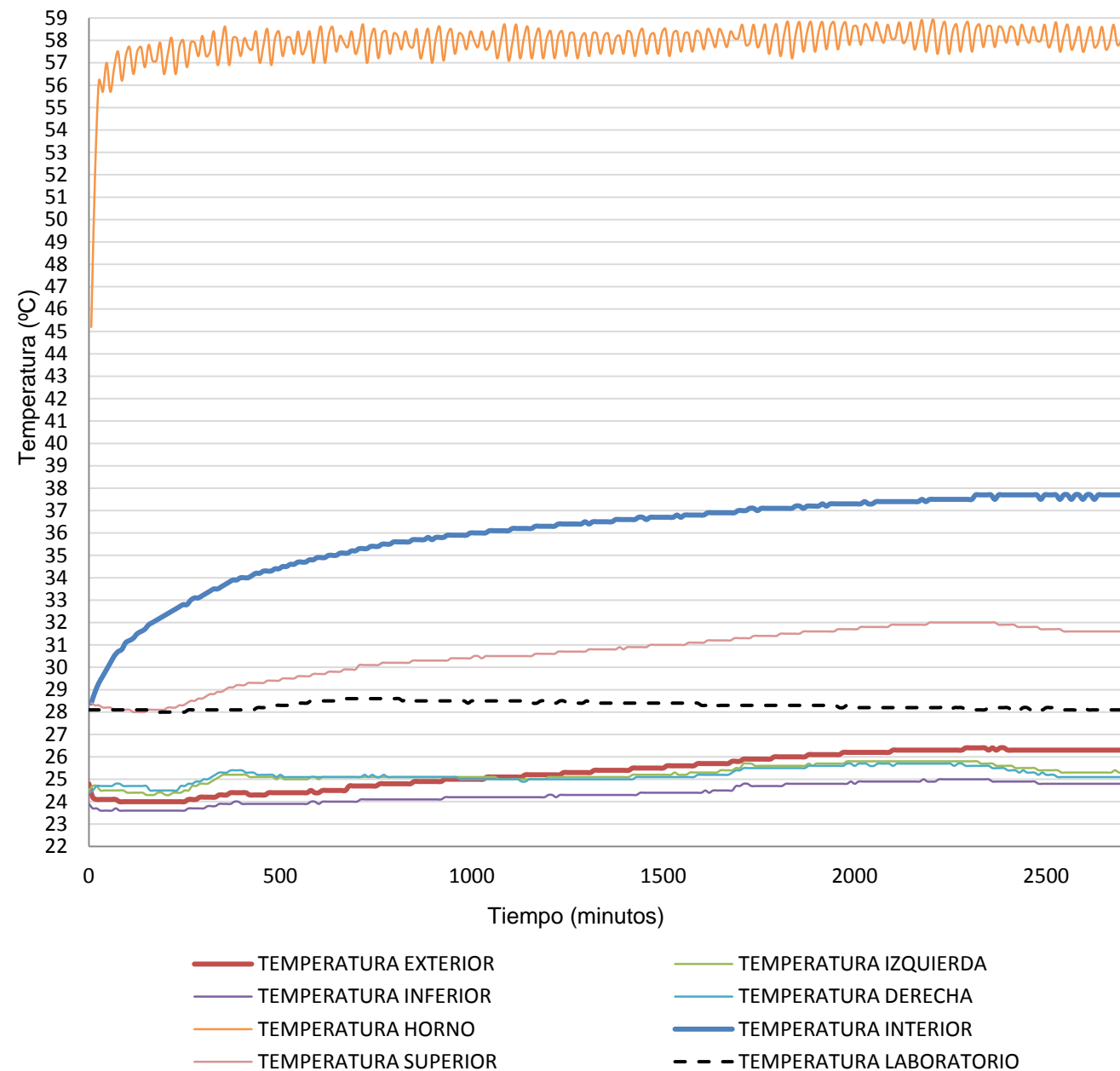
En el laboratorio se han analizado 5 probetas diferentes, dos de ellas representaban a la tapia sin estabilizar, una de ellas a la tapia estabilizada con arlita hasta 8mm de diámetro y las dos restantes a la tapia estabilizada con arlita hasta 10mm de diámetro.

Cada probeta se ha analizado dos veces mediante este ensayo, partiendo de una situación de reposo, por lo que hemos obtenido 10 gráficas diferentes. En las gráficas 9.4.3-1, 9.4.3-2 y 9.4.3-3, se muestran los datos medios de cada uno de los paramentos analizados.

Gráfica 9.4.3-1: Comportamiento térmico medio de la tierra sin estabilizar



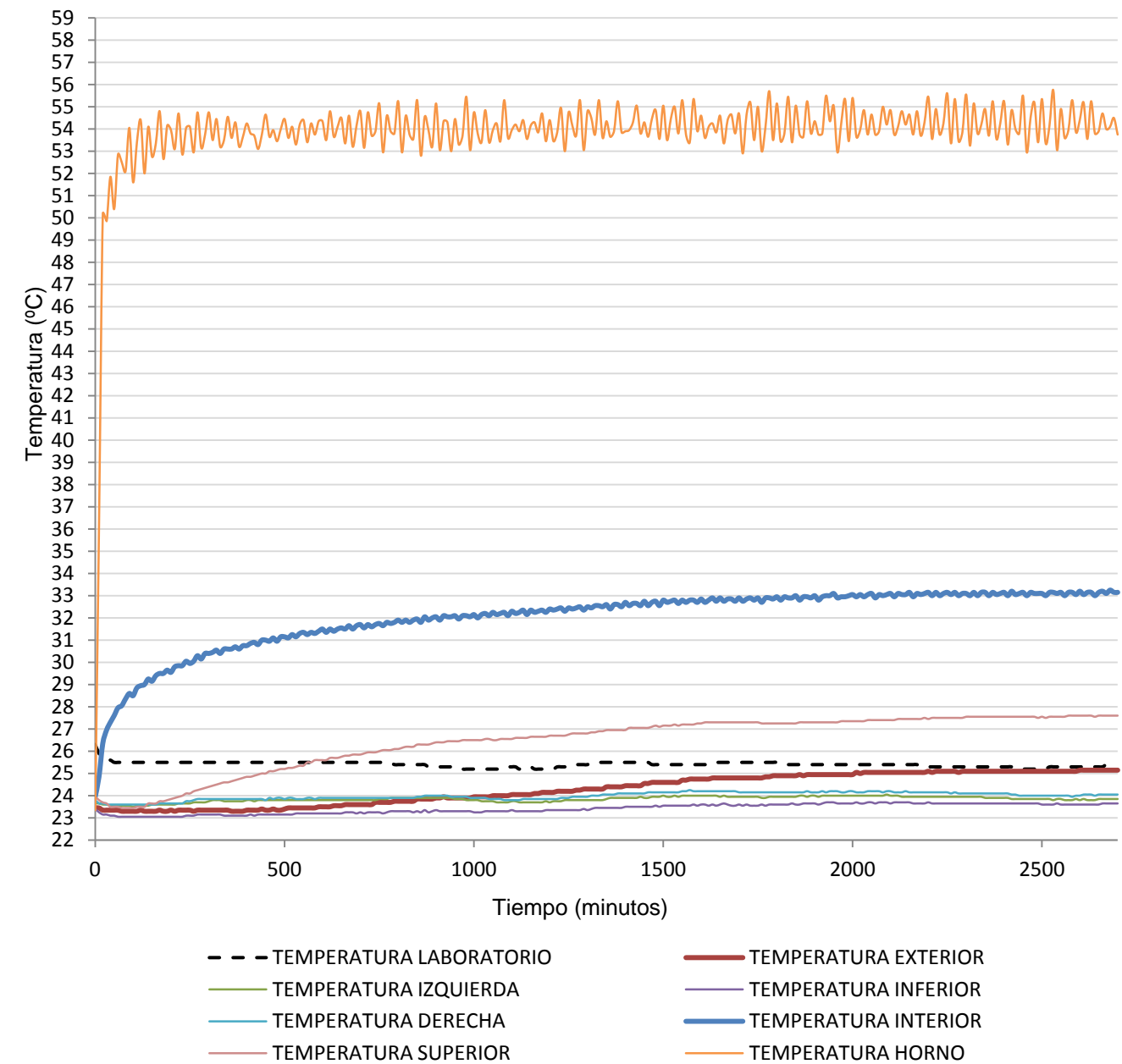
Gráfica 9.4.3-2: Comportamiento térmico medio de tierra estabilizada con arlita hasta 8mm de diámetro



Lo primero que podemos observar es que la tapia estabilizada con arlita, hasta 8mm de diámetro, en su cara interior, la más cercana a la fuente de calor, tiene una subida de temperatura más paulatina respecto a los otros dos cerramientos pero le cuesta más estabilizarse, alrededor de los 2250 minutos. Tanto la tierra sin estabilizar como la estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, tienen una subida de temperatura más rápida pero tardan menos en estabilizarse, en el caso de la tierra sin estabilizar lo hace sobre los 2000 minutos y para la tierra estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, es la más rápida en estabilizarse y lo hace a los 1750 minutos.

También podemos ver que la cara superior de la probeta tiene una temperatura más elevada que su cara exterior. Esto es debido a que el aire caliente tiende a elevarse, por lo que detectamos más calor en la parte superior de la probeta que en la cara exterior, que es la que nos interesa. La pérdida de calor por esta zona es de 3,5°C de media. En el resto de caras también podemos ver que existe pérdida de calor, pero es más uniforme en todos los casos, es aproximadamente 1°C de media.

Gráfica 9.4.3-3: Comportamiento térmico medio de tierra estabilizada con arlita hasta 10mm de diámetro



La relación entre la temperatura interior y exterior es significativa, podemos apreciar muy claramente que existe una gran diferencia entre ellas. El dato más significativo lo vemos en la tapia estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, donde la diferencia entre la temperatura exterior e interior es de 8°C y ha supuesto un incremento de 2°C en la cara exterior respecto del inicio; en cambio en las otras dos tenemos un aumento del 11,23°C para la tapia sin estabilizar, con un incremento de 3,7°C de la cara exterior respecto del inicio, y del 11,40°C para la tapia estabilizada con arlita, hasta 8mm de diámetro con un incremento de 2°C respecto del inicio.

Todos estos datos nos reflejan que la tapia que mejor se comporta a nivel térmico para temperaturas cálidas es la tapia estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, ya que absorbe menos temperatura del exterior y la que mantiene una temperatura interior más estable.

Se ha consultado la *guía práctica de la energía, consumo eficiente y responsable* [10] para conocer el consumo medio de una vivienda en verano en clima mediterráneo. Según esta guía, es aconsejable que no exista una diferencia máxima entre la temperatura exterior e interior superior a los 12°C, en nuestro caso cualquiera de las

tres soluciones nos cumpliría con esta recomendación.

También recomienda que la temperatura en interior, en verano, no sea inferior a los 26°C. En nuestro caso las temperaturas interiores alcanzadas son las siguientes:

- paramento de tierra sin estabilizar → 26,1°C
- Paramento estabilizado con arlita, hasta 8mm de diámetro → 26,3°C
- Paramento estabilizado con arlita, hasta 10mm de diámetro → 25,1°C

Según estos datos podemos ver que prácticamente no necesitaríamos utilizar sistemas de refrigeración ya que no alcanzamos temperaturas superiores a lo recomendado. De todas formas, estos datos nos aportan información sobre el paramento y no sobre las condiciones interiores de la vivienda por lo que hay que destacar que cada grado de temperatura que descendemos en el interior de una estancia mediante sistemas de aire acondicionado, implica un aumento del consumo eléctrico del 7%.

9.5. ENSAYO DE MONITORIZACIÓN DE LAS PROBETAS. SIMULACIÓN INVIERNO.

9.5.1. OBJETIVO

Determinar el comportamiento que tienen las probetas frente a los descensos de temperatura en el exterior del paramento, intentando reproducir una situación real en invierno con la ayuda de una nevera.

9.5.2. PROCESO

Los pasos a seguir para la realización del ensayo se detallan a continuación:

Aislar, lo mejor posible, las probetas que vamos a ensayar, exceptuando dos caras que consideramos la interior y la exterior del muro, para evitar la pérdida de calor una vez empiece el ensayo.

Fotografía 9.5.2-1: Aislamiento de probetas con poliestireno extruido



Fotografía 9.5.2-2: Aislamiento con poliestireno expandido



Colocar en todas y cada una de las caras de la probeta, 6 caras a controlar, así como en el interior del horno un sensor termopar tipo K conectado a un data logger que guardará los datos del ensayo cada 10 minutos hasta temperatura constante de las caras interior y exterior.

Fotografía 9.5.2-3: Colocaciones sensores en nevera, donde ya está aislada la zona de la puerta



Fotografía 9.5.2-4: Colocación sensores en probeta



Acoplar una de las caras de la probeta, que consideraremos la cara exterior del muro, a la boca de la nevera, de la cual podemos controlar su temperatura, en este caso la temperatura mínima que podemos conseguir con esta nevera son 10°C, y aislar todas las zonas que sean susceptibles de producir pérdida de calor del experimento. Es necesario controlar las condiciones de temperatura y humedad, por lo que colocaremos un data logger que nos controle las condiciones ambientales.

Fotografía 9.5.2-5: Vista, desde arriba, del aislamiento lateral e inferior de la nevera



Fotografía 9.5.2-6: Aislamiento del conjunto con los data logger para tomar datos



El ensayo tiene una duración de 66h, durante ese tiempo tomaremos datos de la temperatura cada 10 minutos. El ensayo tiene esta duración de tiempo ya que, con los experimentos iniciales que se hicieron, se consideró que era el tiempo óptimo para conseguir un equilibrio térmico entre la cara interior y la cara exterior de la probeta.

El motivo por el cual se coloca un sensor termopar en cada cara de la probeta es para determinar la pérdida o ganancia de calor que pueda generarse por esa zona.

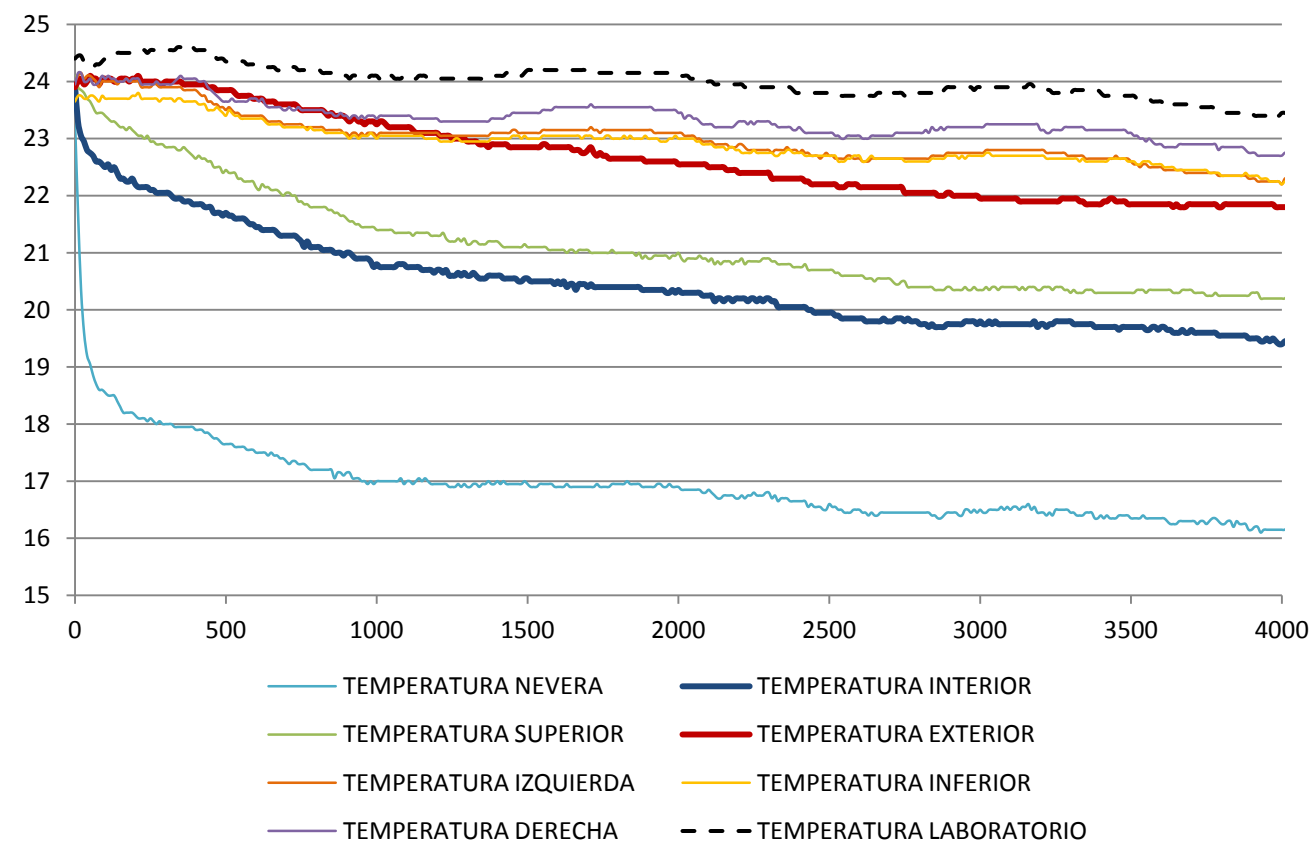
Nosotros hemos aislado las probetas mediante aislamiento de poliestireno extruido o de celulosa, y hemos rellenado los huecos con poliestireno expandido ya que las probetas no tenían las caras perfectamente rectas. Pero sabemos que este aislamiento no es suficiente para impedir el paso del calor, sería necesario mucho aislamiento para poder impedir la pérdida de calor. El caso de frío es diferente al explicado anteriormente. El frío es la ausencia del calor por lo que es muy importante impedir que el calor exterior interfiera en el proceso y tomar datos de los puntos débiles del sistema.

9.5.3. RESULTADOS

En el laboratorio se han analizado 5 probetas diferentes, dos de ellas representaban a la tapia sin estabilizar, una de ellas a la tapia estabilizada con arlita hasta 8mm de diámetro y las dos restantes a la tapia estabilizada con arlita hasta 10mm de diámetro.

Cada probeta se ha analizado una vez mediante este ensayo, nos habría gustado que fueran dos veces pero técnicamente no ha sido posible ya que hasta finales de septiembre no obtuvimos datos válidos por culpa de la entrada de calor exterior que impedía la estabilización del conjunto, por lo que hemos obtenido 5 gráficas diferentes. En las gráficas 9.5.3-1, 9.5.3-2 y 9.5.3-3, se muestran los datos medios de cada uno de los paramentos analizados.

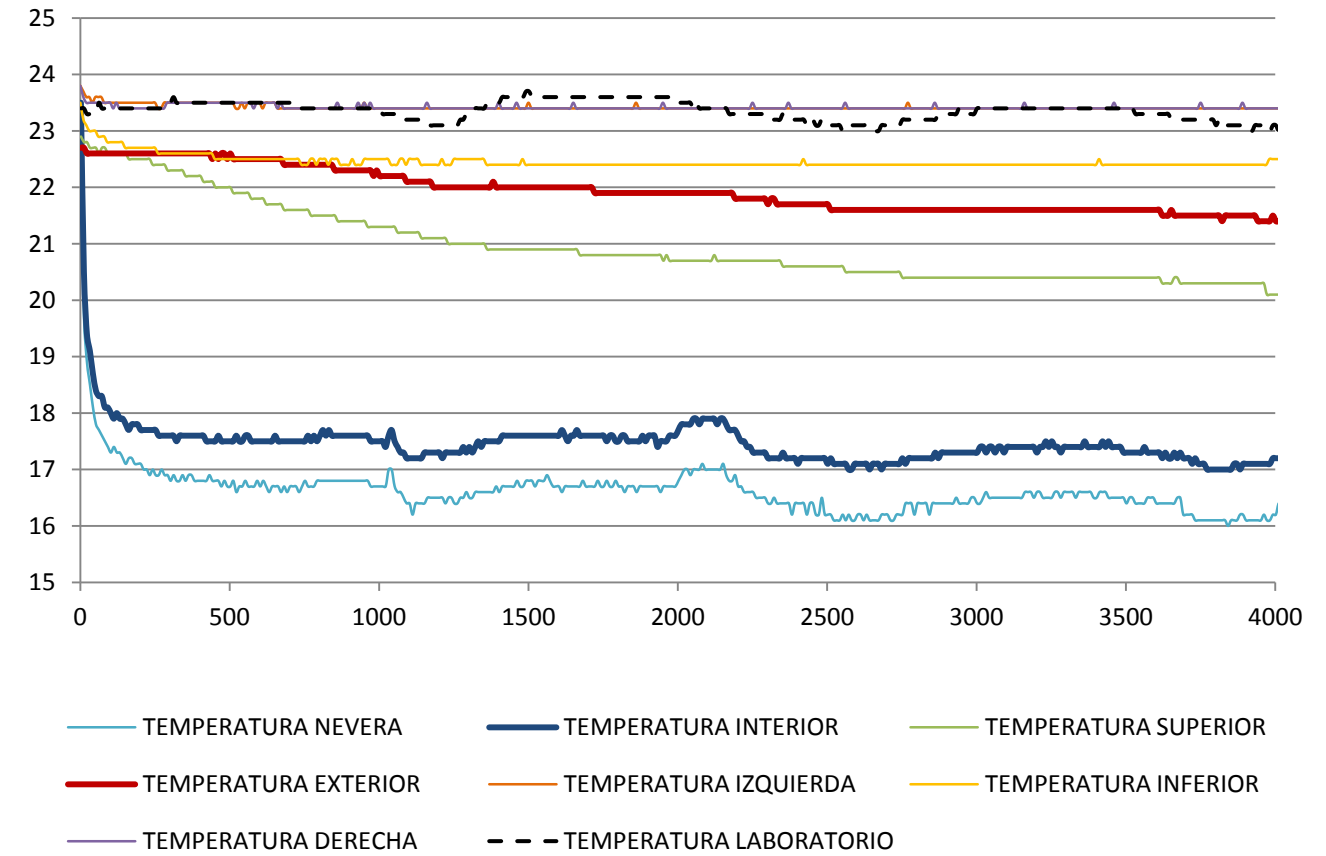
Gráfica 9.5.3-1: Comportamiento térmico medio de la tierra sin estabilizar



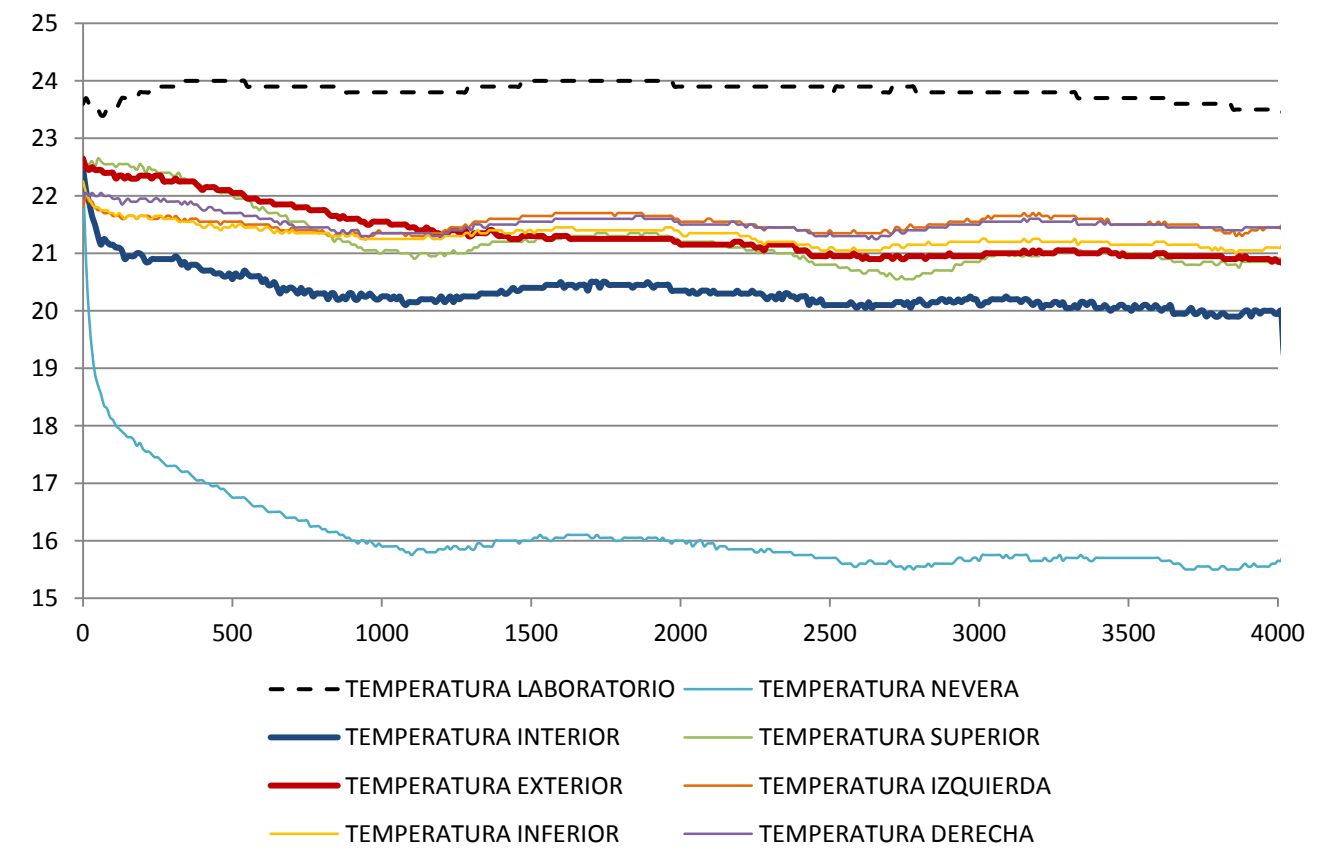
Lo primero que podemos observar es que la tapia estabilizada con arlita, hasta 8mm de diámetro, en su cara interior, la que está en contacto con la nevera, tiene una bajada de temperatura muy brusca, de 5,5°C en 1,5 horas, este descenso brusco también lo podemos observar para la tapia estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, pero se estabiliza perdiendo menos temperatura, en este caso 2,5°C. El muro que tiene un descenso más paulatino de la temperatura es el de tierra sin estabilizar.

Lo que podemos determinar es que la arlita, hasta 8mm de diámetro, tiene más facilidad para ceder el calor acumulado en contacto con un ambiente más frío que él en comparación con el resto de los cerramientos.

Gráfica 9.5.3-2: Comportamiento térmico medio de tierra estabilizada con arlita hasta 8mm de diámetro



Gráfica 9.4.3-3: Comportamiento térmico medio de tierra estabilizada con arlita hasta 10mm de diámetro



Si nos fijamos en la relación entre la temperatura exterior y la interior podemos ver claramente que la que tiene una diferencia mayor entre estos dos valores es la tapia estabilizada con arlita, hasta 8mm de diámetro, que tiene una diferencia de 4,5°C frente a los 2,5°C de la tapia sin estabilizar o a la otra tapia estabilizada con arlita que solo tiene una diferencia de 1°C. Según la *guía práctica de la energía, consumo eficiente y responsable* [10], todos los valores serían válidos ya que aconsejan que la diferencia entre la temperatura interior y la exterior no sea superior a 12°C.

Lo que también podemos observar es la diferencia entre la temperatura del paramento, en su cara exterior, antes de empezar el ensayo y al estabilizar su pérdida de calor. El que más calor pierde es la tapia sin estabilizar, 2°C, y las tapias estabilizadas pierden entre 1°C, para la arlita hasta 8mm de diámetro, y 1,5°C, para la arlita hasta 10mm de diámetro.

La *guía práctica de la energía, consumo eficiente y responsable* [10], nos recomienda que en invierno se mantenga la temperatura mínima interior de la vivienda entre 19°C y 21°C. Los tres cerramientos tienen una temperatura en la cara exterior de la probeta muy similar:

- paramento de tierra sin estabilizar → 21,7°C
- Paramento estabilizado con arlita, hasta 8mm de diámetro → 21,5°C
- Paramento estabilizado con arlita, hasta 10mm de diámetro → 20,9°C

En cualquiera de los tres casos, y suponiendo que es un caso hipotético en el laboratorio, estaríamos cumpliendo con estas recomendaciones por lo que no necesitaríamos ningún sistema de calefacción para tener una temperatura de confort. Este dato es correcto para nosotros porque no tenemos actualmente una bomba de calor que nos proporcione temperaturas menores de las representadas en este ensayo y todavía no podemos conocer el comportamiento del prototipo en invierno porque no hace frío; pero sabemos que en invierno la temperatura exterior mínima puede ser inferior a 0°C, según los datos del *Observatori Fabra* el 11 de Febrero de 1956 en Barcelona se llegó a los -10°C, por lo que suponemos que será necesario dotar de un sistema de calefacción a una futura vivienda realizada con tapia pero el ahorro energético puede ser importante. Para poder confirmar esta suposición, será necesario esperar a que otro Proyecto Final de Grado trabaje con los datos del prototipo en invierno.

La finalidad de realizar este ensayo con la nevera es comprobar cómo se comporta el muro estabilizado con arlita, como aislamiento térmico, frente al muro sin estabilizar y podemos ver que la arlita hasta 10mm de diámetro tiene un mejor comportamiento que la arlita hasta 8mm de diámetro.

9.6. ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

9.6.1. OBJETIVO

Determinar la resistencia a compresión que soportan las probetas.

9.6.2. OBSERVACIONES

Para poder conocer la resistencia a compresión de las probetas, primero se tuvieron que cortar por la mitad para conseguir un elemento más manipulable y refrentar tanto la cara superior como la cara inferior para poder obtener datos del conjunto del elemento.

Gráfica 9.6.2-1: Corte probeta con radial



Gráfica 9.6.2-2: Refrentado de probetas



9.6.3. PROCESO

El ensayo consiste en, mediante la utilización de la prensa y de un aparato para conocer la deformación que sufrirá la probeta, llevar al límite la muestra hasta su rotura y conocer la relación entre la tensión y la deformación que se ejerce sobre ésta.

Gráfica 9.6.2-1: Preparación ensayo

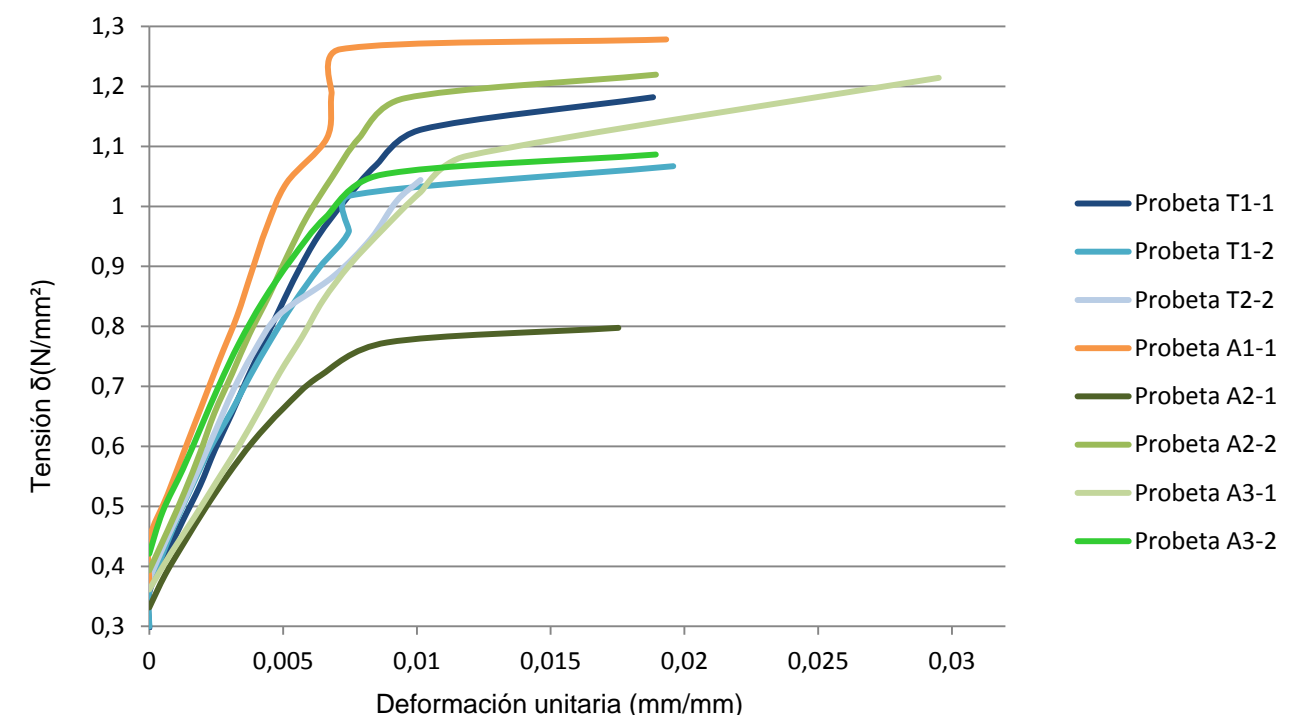


Gráfica 9.6.2-1: Rotura probeta



9.6.3. RESULTADOS

Gráfica 9.6.3-1: Resultados del ensayo de rotura de las probetas, gráfica tensión deformación



Lo primero que observamos es que tanto la tensión como la deformación unitaria son valores muy pequeños, en otros trabajos, donde también se ha estudiado la resistencia a compresión de probetas de tierra, los valores eran algo superiores.

También podemos ver que las probetas de tierra sin estabilizar mantienen unos valores más similares, en cambio las probetas estabilizadas con arlita, de hasta 10mm de diámetro, tienen un abanico de resultados mayor. Es una lástima que una de las dos muestras de tierra estabilizada con arlita, de hasta 8mm de diámetro,

se rompiera antes de hacer el ensayo y solo tengamos una muestra como resultado (probeta A1-1).

A partir de la gráfica de tensión deformación se han hallado los valores de resistencia de cada una de las probetas, tabla 9.6.3-2.

Tabla 9.6.3-2: Resultados de la resistencia a compresión de las probetas

Probeta	Media distancia	Paramento	Media
T1-1	9,567 kg/cm ²	Tierra sin estabilizar	9,863 kg/cm ²
T1-2	9,9136 kg/cm ²		
T2-2	10,108 kg/cm ²		
A1-1	11,390 kg/cm ²	Tierra estabilizada con arlita hasta 8mm de diámetro	11,390 kg/cm ²
A2-1	6,537 kg/cm ²	Tierra estabilizada con arlita hasta 8mm de diámetro	8,365 kg/cm ²
A2-2	9,449 kg/cm ²		
A3-1	7,457 kg/cm ²		
A3-1	10,019 kg/cm ²		

Los valores anteriores son más bajos de los esperados inicialmente. Pensábamos que la resistencia a compresión de las probetas era superior pero, es posible, que el “maltrato” sufrido durante todos los ensayos, y en particular en el corte con radial y el refrentado de las probetas, haya podido alterar su resistencia.

Lo que podemos observar en estos valores es la relación que existe entre ellos. Era de esperar que la tapia estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, fuera la menos resistente del grupo ya que es la que tiene más árido grueso, y frágil, y menos ligante para mantener el elemento unido y cohesionado. La tierra sin estabilizar tiene una resistencia intermedia entre las dos tapias estabilizadas con arlita; esto puede ser debido a que la granulometría de la tierra con arlita estaba seleccionada y no tenía tanta cantidad de piedras.

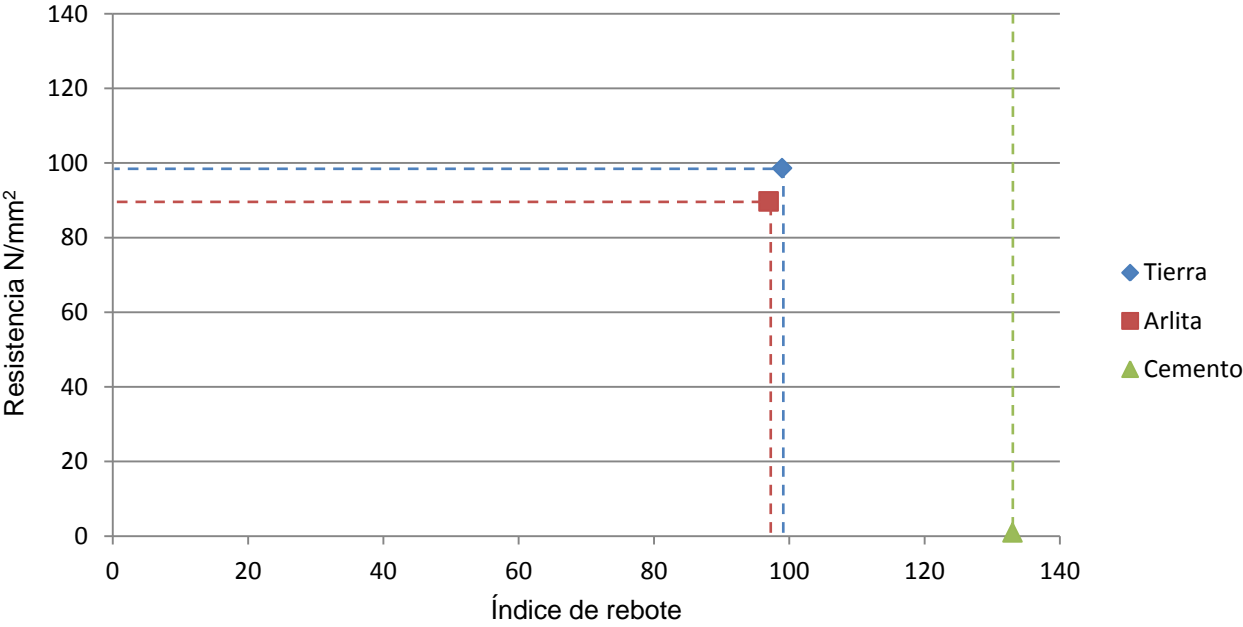
Lo que vemos es que la más resistente de las tres muestras ensayadas es la tapia estabilizada con arlita, hasta 8mm de diámetro. Estos valores pueden ser engañosos porque solo disponemos de una muestra ensayable y puede que el valor obtenido sea anómalo. De todas formas puede que debido a su bajo porcentaje de arlita, que es más resistente que la de 10mm, y a la mejor selección del árido durante el proceso de tapiado haya servido para conseguir unas mejores prestaciones a nivel térmico y una resistencia mayor de la esperada.

No tenemos ninguna muestra que contenga cemento pero creemos que es la más resistente a compresión de las tipologías de tapia estudiadas en este proyecto.

En la gráfica 9.6.3-3 podemos ver la relación que existe entre la resistencia a compresión de las probetas ensayadas y el índice de rebote que indica el Martillo Schmidt. No conocemos la resistencia de la tapia estabilizada con cemento pero podemos intuir que sería superior al resto; la tapia sin estabilizar tendría un valor intermedio entre la tapia estabilizada con arlita, que es ligeramente inferior.

Como conclusión podemos afirmar que los resultados del ensayo a compresión, no serían válidos para garantizar la resistencia de la estructura por lo que no podríamos utilizar los muros construidos como parte estructural del prototipo. Aun así podemos ver que existe una correlación entre los datos del martillo Schmidt y los del ensayo de compresión, de la misma forma que sucede con el hormigón, que nos reflejan el orden de resistencia del material.

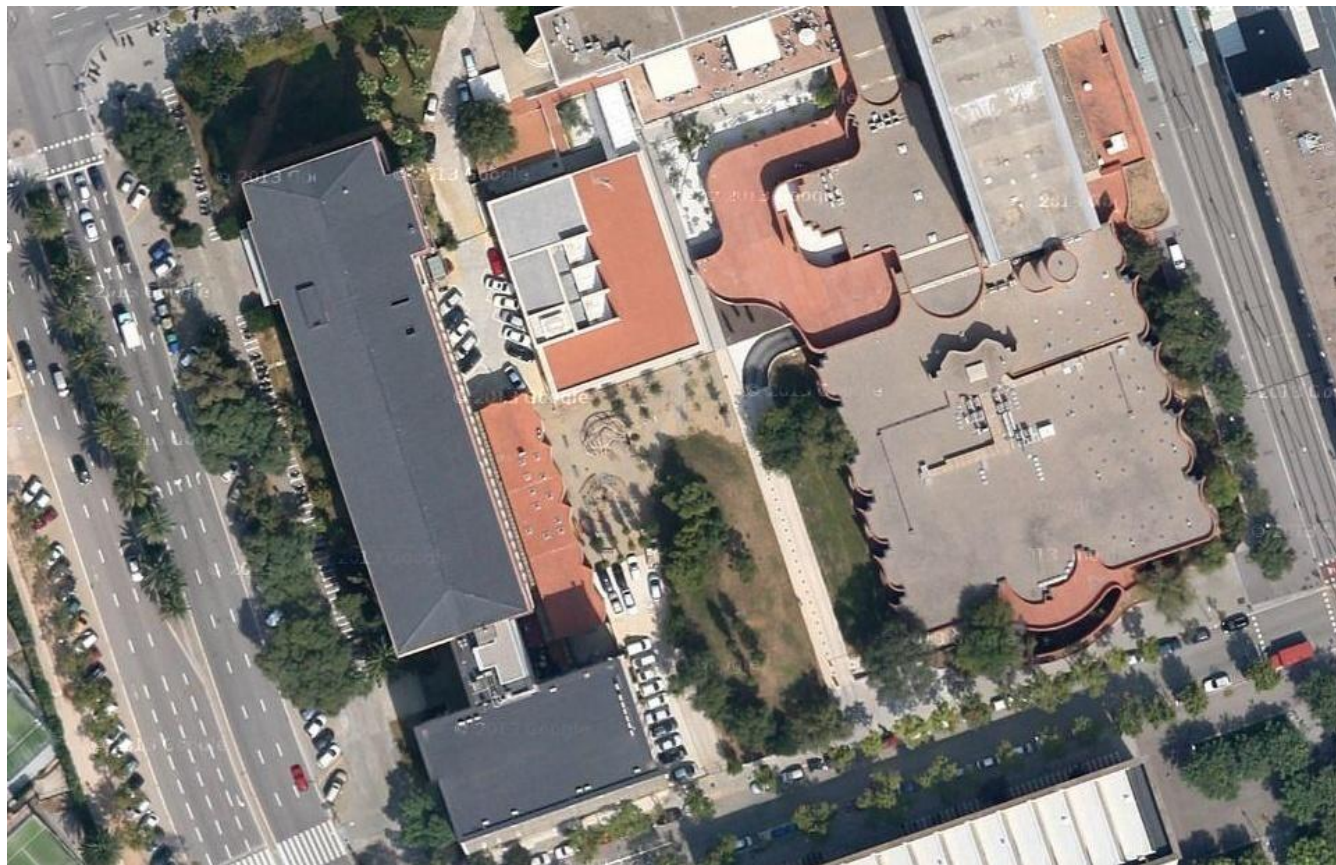
Tabla 9.6.3-3: Relación entre la resistencia a compresión y el índice de rebote



10. MONITORIZACIÓN DEL PROTOTIPO

El prototipo está situado en el patio trasero de la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB), situada en Avenida del Doctor Marañón número 44, en frente de la biblioteca de la ETSAB y su localización exacta es Latitud (41°23'1,39" N), Longitud (2°6'48,82" E).

Fotografía 10-1: Vista aérea de la localización del prototipo



La zona climática, según el Código Técnico de la Edificación, es una BII que corresponde a zona mediterránea prelitoral central. Las características que esta zona climática son precipitaciones medias anuales de entre 600 y 900mm, concentradas mayoritariamente en otoño y en menor intensidad en primavera, y temperaturas medias anuales que oscilan entre 12°C y 15°C.

Tal y como se ha comentado anteriormente, durante la construcción del prototipo se introdujeron en el muro cuatro sensores diferentes, tres de ellos para poder estudiar el comportamiento térmico del muro en diferentes puntos y uno para conocer la humedad de la tapia. Los sensores de temperatura se distribuyen por el muro de manera que tengamos datos de la zona exterior, sin ser la temperatura ambiente, de la zona central del muro y de la zona interior, sin ser la temperatura interior del prototipo. El sensor de humedad está situado en el centro del muro.

Los sensores no están repartidos por todo el prototipo de forma aleatoria, sino que sólo se estudian dos de su cuatro caras orientadas, la cara Norte y la cara Sur. Estudiamos estas dos orientaciones porque son las que reciben la mínima y la máxima radiación solar, respectivamente, durante el año por lo que son las más interesantes de conocer a nivel de comportamiento térmico. Por ese mismo motivo, las particiones de tapia estabilizadas también se encuentran orientadas o en la cara Norte, tapia estabilizada con arlita, o en la cara Sur, tierra estabilizada con cemento. En las siguientes fotografías podemos ver la colocación de los sensores en el interior de la tapia y como se realizó la monitorización interior del prototipo.

Fotografía 10-2: Sensores dentro de la tapia en un muro listo para ser tapiado



Fotografía 10-3: Sensores la tapia antes de colocar el encofrado



Una vez acabada la fase de construcción, se decidió dar dos tipos de acabados interiores distintos. La cara Norte interior estabilizada con arlita y la cara Sur interior sin estabilizar no conservan el encofrado, de esta forma podemos apreciar la ejecución del muro interior, en cambio el resto sí conserva el encofrado perdido de la construcción. En el interior del prototipo se coloca la maquinaria necesaria para la monitorización de la humedad y la temperatura.

Fotografía 10-4: Sensores en cara Norte



Fotografía 10-5: Sensores en cara Sur



La monitorización se realiza a través del equipo de adquisición, Compact RIO, que tiene la misma función que un data logger pero con más puertos de entrada disponibles, con el que podemos conocer la temperatura y la humedad de la tapia, pero necesita un soporte informático para poder almacenar los datos, en este caso un ordenador. Los datos se gestionan a través de una aplicación informática, MAD_cRIO CasasLow, desarrollada en LABView y gestionada entre el laboratorio de materiales y el laboratorio del fuego.

Una vez disponemos de la aparatología necesaria, hay que calibrar los datos del programa, tanto los de humedad como los de temperatura. Los datos de temperatura se calibran mediante un data logger con el que se relaciona la lectura que nosotros obtenemos con la que deberíamos obtener realmente. Para los datos de humedad se intenta algo parecido, a través de un recipiente con tierra húmeda se va conociendo su humedad de forma periódica y se va relacionando con los datos del programa. Lamentablemente no parece haber una relación clara entre unos datos y otros por lo que se descarta poder obtener algún dato fiable por el momento. Esto implica que sólo se recogen datos de temperatura del prototipo para este trabajo, pero se sigue trabajando en una solución para conseguir también datos de humedad.

Fotografía 10-6: Montaje y calibrado del sistema de recepción de datos



Fotografía 10-7: Sistema de calibrado para los sensores de humedad



Durante la calibración de los sensores, nos damos cuenta que existen problemas de lectura por lo que hay que revisar uno por uno los sensores y sacarlos de la tapia para comprobar su estado. Esto supone que para poder extraer los sensores del centro del muro hay que hacer agujeritos para poder sacar el termopar y luego volver a introducirlo. Este suceso nos afecta ligeramente ya que no es posible introducir nuevamente los sensores en el interior de la tapia a la misma profundidad donde se habían colocado inicialmente. De todas formas consideraremos en nuestros ensayos que se encuentra en el centro del muro ya que no conocemos su posición exacta.

Fotografía 10-8: Proceso de extracción del sensor



Fotografía 10-9: Reparación extracción sensor



Fotografía 10-10: Vista interior Este

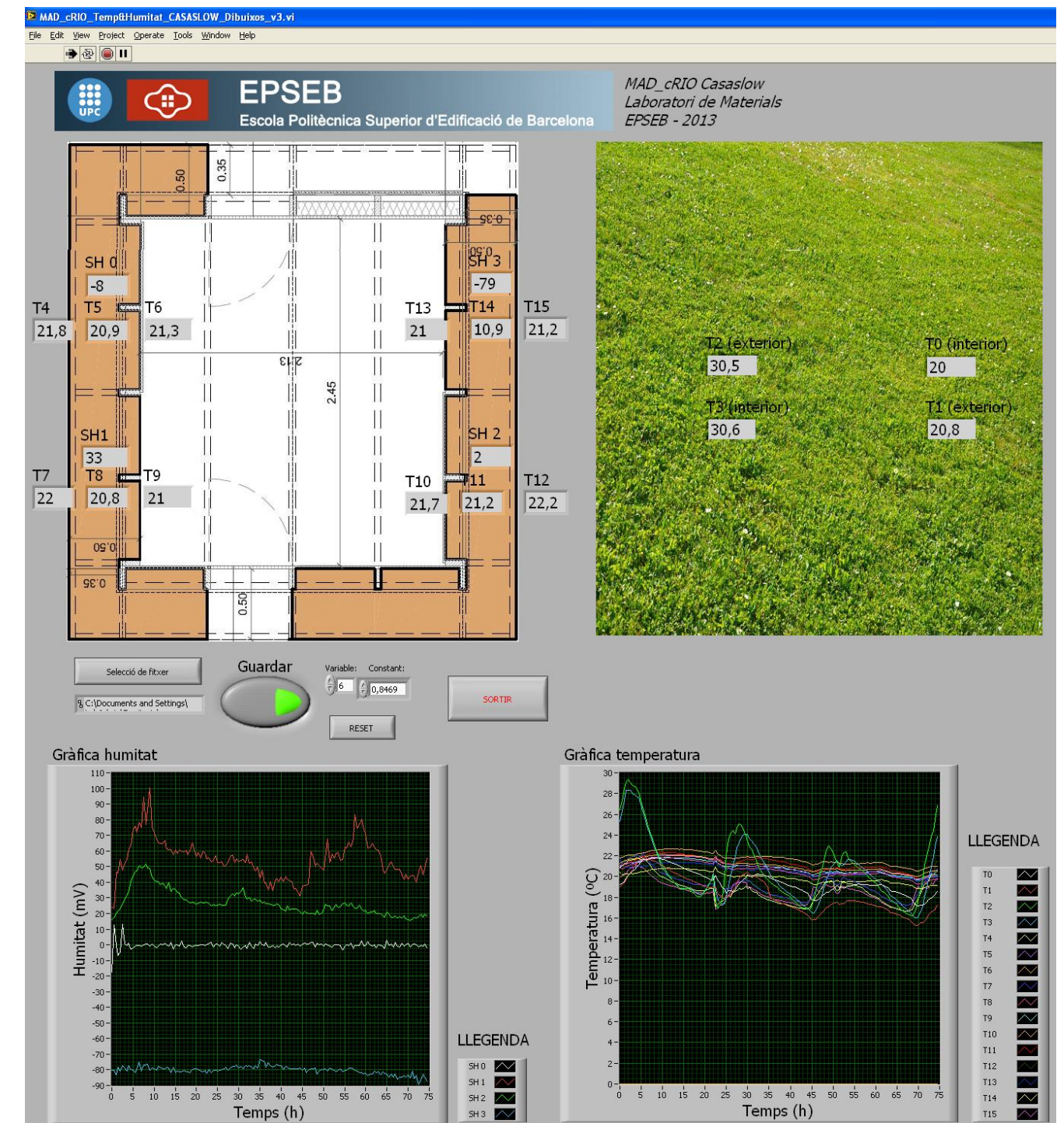


Fotografía 10-11: Vista interior Oeste



Una vez está todo listo, incorporamos un data logger en el interior del prototipo para controlar la humedad y la temperatura interior; y para conocer los datos ambientales tomamos como referencia los de la estación meteorológica situada en Zona Universitaria, que se pueden consultar por internet a través de la web del Servicio Meteorológico de Cataluña.

Captura de pantalla 10-12: Programa MAD Crio con el que realizamos la recogida de datos



Con este sistema podemos conocer el comportamiento térmico de los paramentos monitorizados cada 30 minutos y de forma continua. De todas formas, el sistema no es infalible y existen algunas lagunas o pérdidas de datos por falta de suministro eléctrico. Los datos los hemos recogido durante los meses de Junio, Julio, Septiembre y Octubre de 2013. En el mes de Agosto no se pudieron recoger datos ya que no era seguro dejar toda la aparatología sin control durante las vacaciones por lo que se suspendió el ensayo hasta Septiembre.

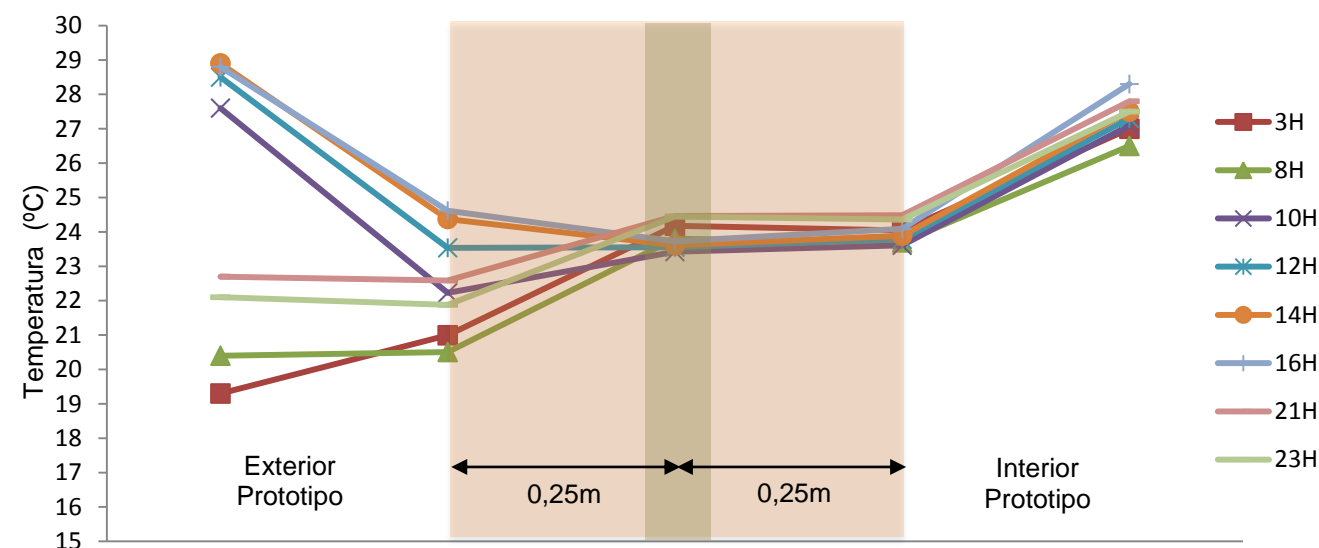
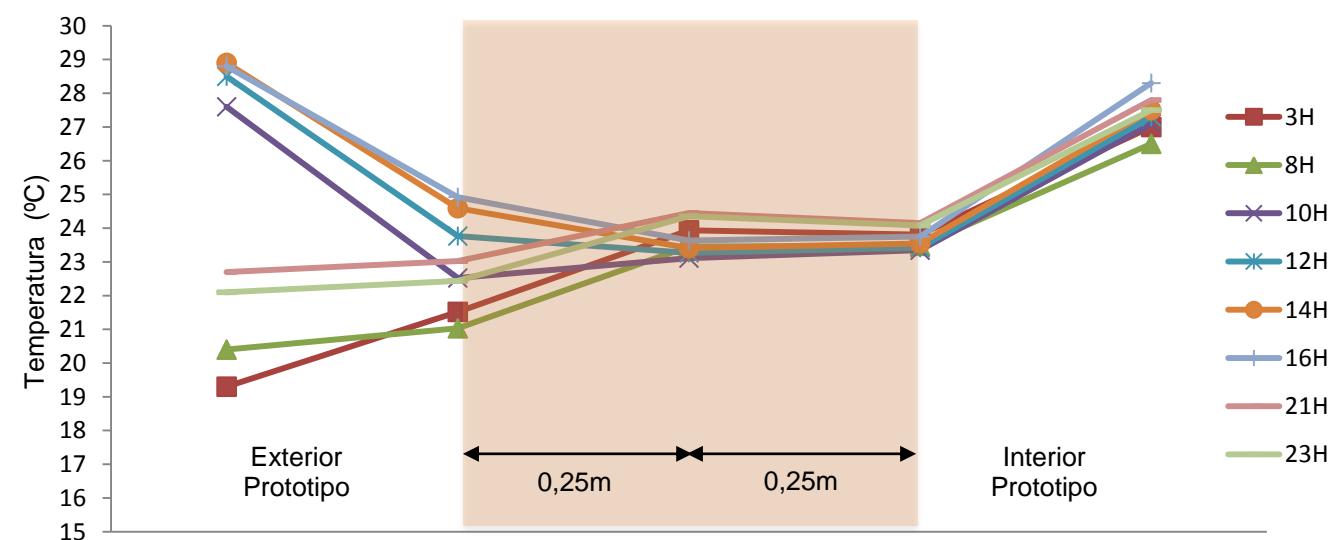
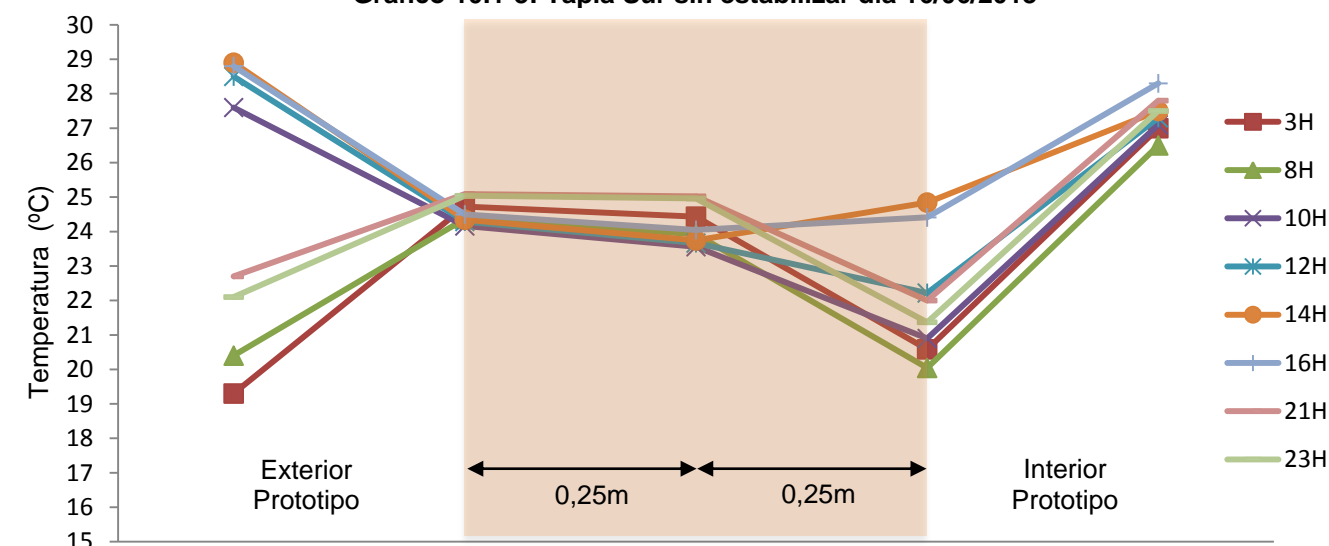
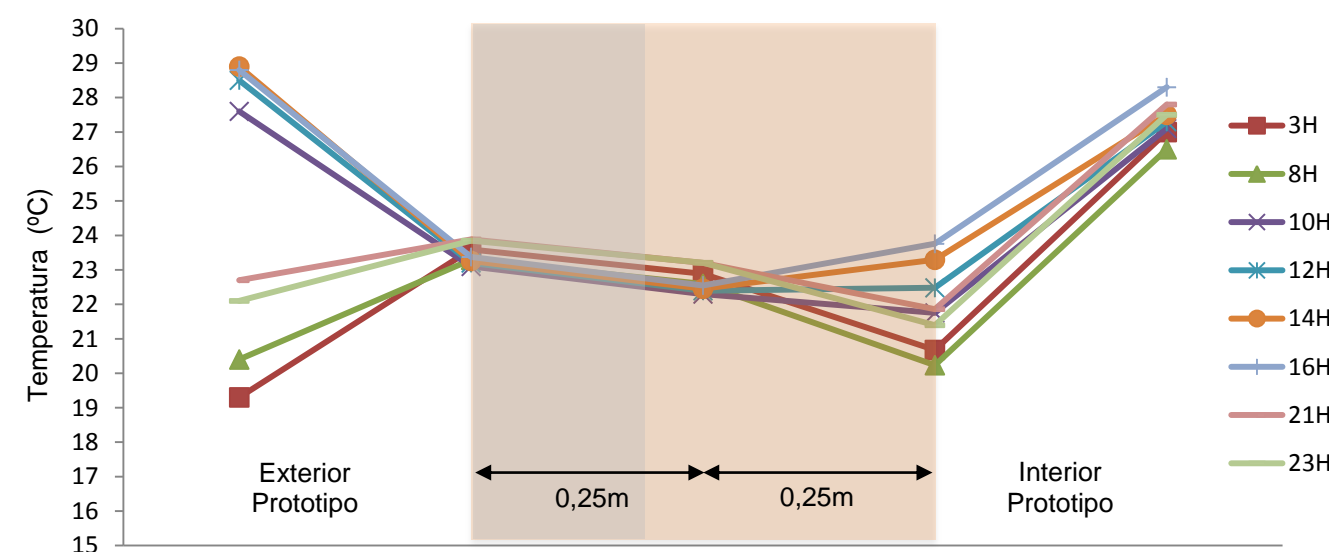
10.1. ENSAYO DE MONITORIZACIÓN DEL PROTOTIPO.**10.1.1. OBJETIVO**

Determinar el comportamiento térmico que tiene la tapia en una situación real.

9.5.2. RESULTADOS

Tenemos muchos datos de la monitorización y es muy complicado trabajar con ellos por lo que se han consultado los datos del *Observatori Fabra* para conocer cuál fue el día con la temperatura máxima para cada uno de los meses que nosotros hemos estudiado. Hemos escogido el día más cálido del mes porque estamos estudiando las temperaturas en verano. Según sus datos, los días más cálidos fueron el domingo 6 de julio, el domingo 28 de julio, el jueves 5 de septiembre y el martes 1 de octubre.

En los anexos de este proyecto se incluyen todas las gráficas, ordenadas por meses y ubicación, que son la base de las analizadas a continuación excepto las de Octubre, que debido a que los datos se recogieron a principios de Noviembre no ha sido posible analizarlas con tanta precisión como el resto de meses y solo se ha estudiado el día más cálido del mes.

Gráfico 10.1-1: Tapia Norte estabilizada con Arlita día 16/06/2013**Gráfico 10.1-2: Tapia Norte sin estabilizar día 16/06/2013****Gráfico 10.1-3: Tapia Sur sin estabilizar día 16/06/2013****Gráfico 10.1-4: Tapia Sur estabilizada con cemento día 16/06/2013**

Como podemos ver en los gráficos del mes de Junio, en la cara Norte del prototipo hay un comportamiento térmico idéntico tanto por parte de la tierra sin estabilizar como de la tierra estabilizada con arlita. Así como podíamos ver que en los ensayos realizados en el laboratorio la tapia estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, daba mejores resultados que la tierra produciendo un salto térmico inferior entre el interior y el exterior del ensayo, en este caso no observamos esa diferencia.

Si podemos ver que a lo largo del día las temperaturas exteriores del muro son diferentes, pero a medida que se transmite el calor por el muro se equiparan sobre los 23,5°C, de media en el centro del muro en ambos casos, y se mantienen hasta el interior del muro.

En la cara Sur del prototipo, podemos apreciar claramente que el cemento hace de filtro frente el calor exterior un poco mejor que la tapia sin estabilizar, de tal forma que a cualquier hora del día la relación entre la temperatura exterior del muro y la central es siempre de pérdida de calor hacia el interior.

Del centro del muro al interior del prototipo en la tapia estabilizada con cemento, podemos ver que a partir del momento en el que la tapia recibe radiación solar, entre 6:00h y 6:30h, las temperaturas empiezan a subir en la cara interior del prototipo hasta las 12h que se estabiliza la temperatura central con la interior. A partir de esa hora aumenta la temperatura siendo la interior mayor que la del interior del muro, hasta que deja de

percibir radiación solar donde nuevamente descienden la temperatura. La diferencia entra la temperatura más baja y la más alta reflejada en el gráfico es de 4°C en el interior del prototipo y a lo largo del día.

Por otra parte, para la tierra sin estabilizar también observamos un comportamiento similar al de la tapia estabilizada con cemento; desde que sale el sol la tapia filtra el calor exterior produciendo una pérdida de calor entre el exterior del muro y su centro pero a partir de las 16h, unas 9,5 horas después de la incidencia del sol, esta variación se estabiliza entre la temperatura registrada en el exterior y en el centro del muro.

Lo que también podemos observar es que el comportamiento del centro del muro al interior del prototipo sigue el mismo patrón de conducta que con el cemento, es decir, las temperaturas empiezan a subir en la cara interior del prototipo hasta las 12h, siendo inferiores a las del centro del muro, y a partir de esa hora aumenta la temperatura siendo la interior mayor que la central, hasta que deja de irradiar el sol en esta orientación donde nuevamente descienden las temperaturas. La diferencia entra la temperatura más baja y la más alta reflejada en el gráfico es de 5°C en el interior del prototipo y a lo largo del día.

Es muy interesante este dato ya que la temperatura interior y exterior del muro son iguales a las 14h, unas 7,5h después de la salida del sol, lo que implica que el retardo térmico medio calculado a partir de los datos obtenidos con las probetas, que era de 7,60h, nos relaciona directamente los resultados térmicos obtenidos en laboratorio con la realidad del prototipo.

Por último, las temperaturas en el interior del prototipo son superiores, en algunos casos, a la exterior. Estos datos son correctos y tienen una doble explicación, por un lado el sistema de recepción de datos, el ordenador, genera calor de forma constante. Hasta mediados de septiembre no tenemos datos suficientes para darnos cuenta de este problema y no realizamos una ventilación correcta del prototipo. Por otro lado el aislamiento de la cubierta no es correcto, por lo que no aísla de las altas temperaturas del exterior, tal y como demuestran las gráficas 1-55, 1-56 y 1-57 del anexo D.

El problema de aislamiento de cubierta no lo podemos solucionar ya que forma parte del estudio de otro Proyecto Final de Grado, lo único que podemos hacer es ventilar correctamente el prototipo según el CTE.

Estos dos factores que nos van a determinar la temperatura elevada del interior del prototipo se repiten en todas las gráficas siguientes.

Gráfico 10.1-5: Tapia Norte estabilizada con Arlita día 28/07/2013

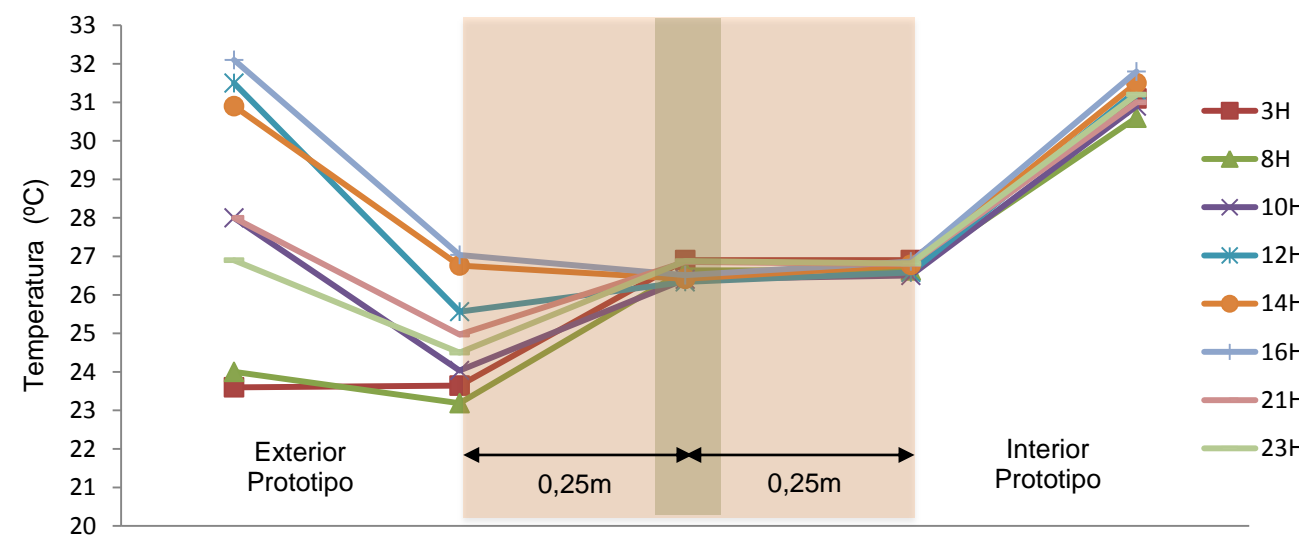


Gráfico 10.1-6: Tapia Norte sin estabilizar día 28/07/2013

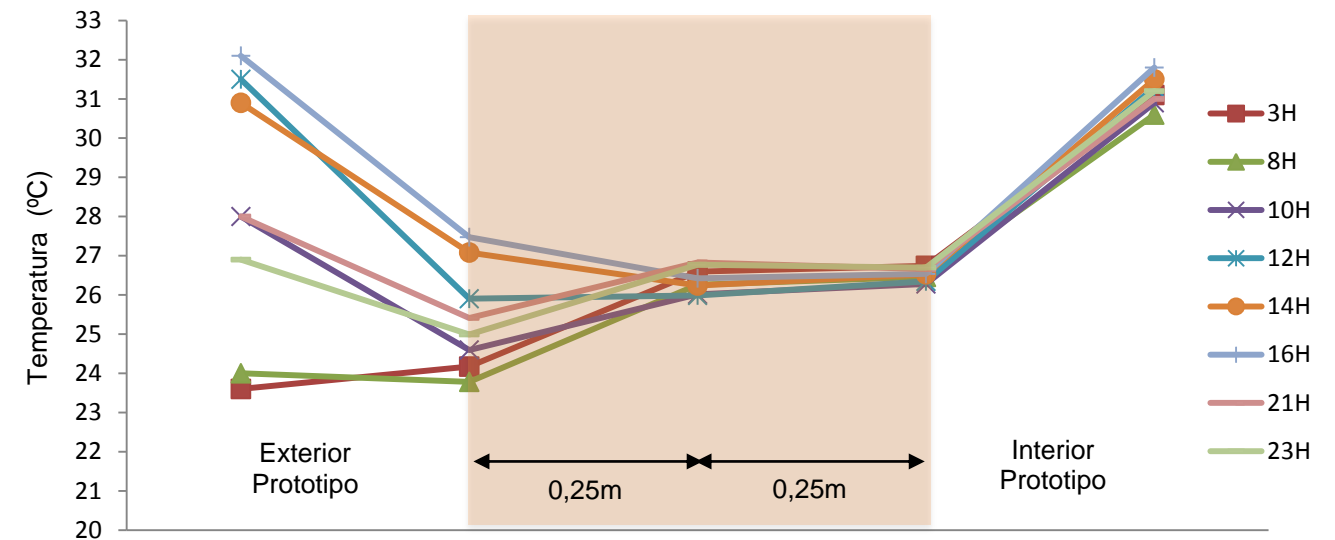


Gráfico 10.1-7: Tapia Sur sin estabilizar día 28/07/2013

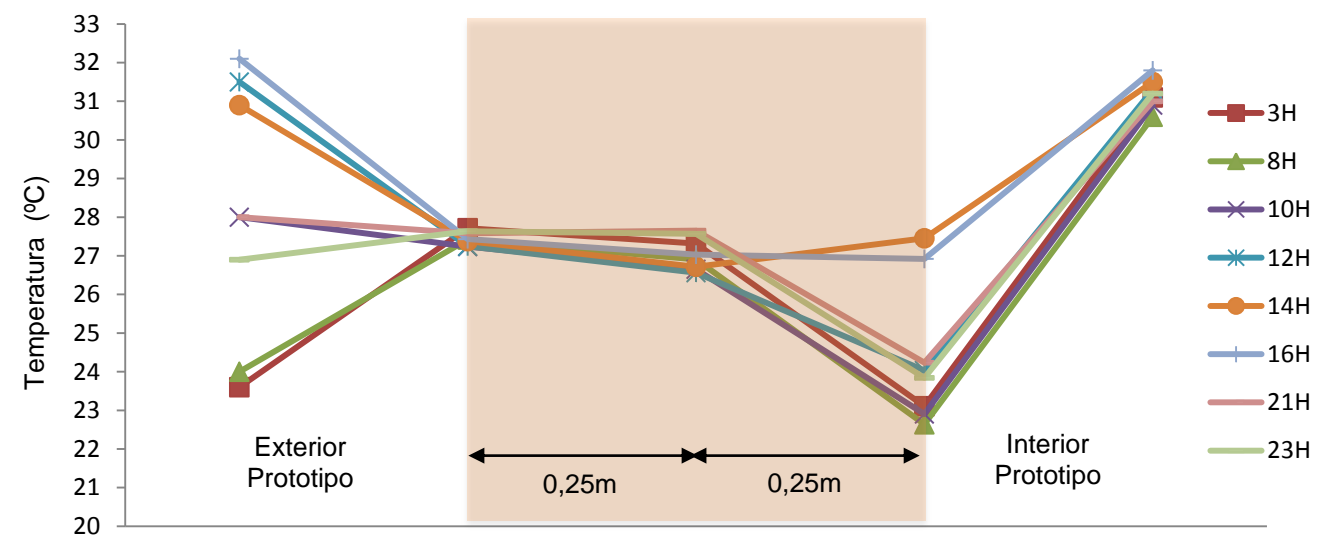
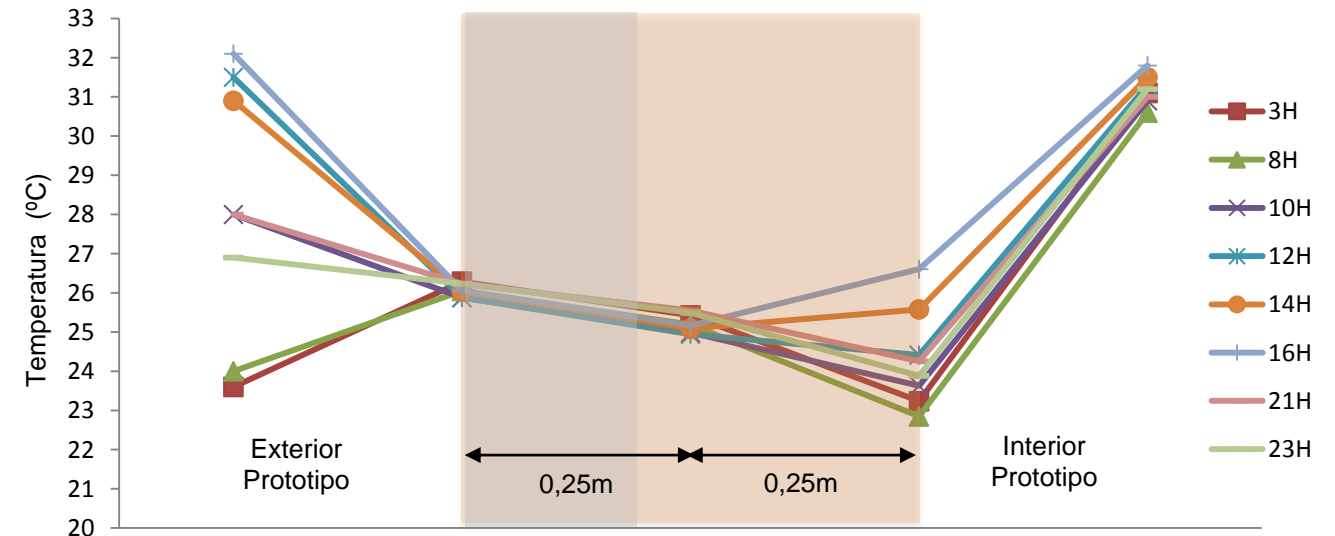


Gráfico 10.1-8: Tapia Sur estabilizada con cemento día 28/07/2013



Como podemos ver en los gráficos del mes de Julio, en la cara Norte del prototipo hay un comportamiento térmico muy parecido tanto por parte de la tierra sin estabilizar como de la tierra estabilizada con arlita. Así como podíamos ver que en los ensayos realizados en el laboratorio la tapia estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, daba mejores resultados que la tierra produciendo un salto térmico inferior entre el interior y el exterior del ensayo, en este caso no observamos esa diferencia.

Si podemos ver que a lo largo del día las temperaturas exteriores del muro son diferentes, pero a medida que se transmite el calor por el muro se equiparan sobre los 26,5°C, de media en el centro del muro en ambos casos, y se mantienen hasta el interior del muro.

En la cara Sur del prototipo, podemos apreciar claramente que el cemento hace de filtro frente el calor exterior un poco mejor que la tapia sin estabilizar, de tal forma que a cualquier hora del día la relación entre la temperatura exterior del muro y la central es siempre de pérdida de calor hacia el interior, 1°C de media.

Del centro del muro al interior del prototipo en la tapia estabilizada con cemento, podemos ver que a partir del momento en el que la tapia recibe radiación solar, entre 6:30h y 7:00h, las temperaturas empiezan a subir en la cara interior del prototipo hasta las 12h que casi está estable la temperatura central con la interior. A partir de esa hora aumenta la temperatura siendo la interior mayor que la del interior del muro, hasta que deja de percibir radiación solar donde nuevamente descenden la temperatura. La diferencia entra la temperatura más baja y la más alta reflejada en el gráfico es de 4°C en el interior del prototipo y a lo largo del día.

Por otra parte, para la tierra sin estabilizar también observamos un comportamiento similar al de la tapia estabilizada con cemento; desde que sale el sol la tapia filtra el calor exterior produciendo una pérdida de calor entre el exterior del muro y su centro pero observamos que a las 16h, unas 9 horas después de la incidencia del sol, esta variación se estabiliza entre la temperatura registrada en el exterior y en el centro del muro.

Lo que también podemos observar es que el comportamiento del centro del muro al interior del prototipo sigue el mismo patrón de conducta que con el cemento, es decir, las temperaturas empiezan a subir en la cara interior del prototipo hasta las 12h, siendo inferiores a las del centro del muro, y a partir de esa hora aumenta la temperatura siendo la interior mayor que la central, hasta que deja de irradiar el sol en esta orientación donde nuevamente descenden las temperaturas. La diferencia entra la temperatura más baja y la más alta reflejada en el gráfico es de 5°C en el interior del prototipo y a lo largo del día.

Gráfico 10.1-9: Tapia Norte estabilizada con Arlita día 05/09/2013

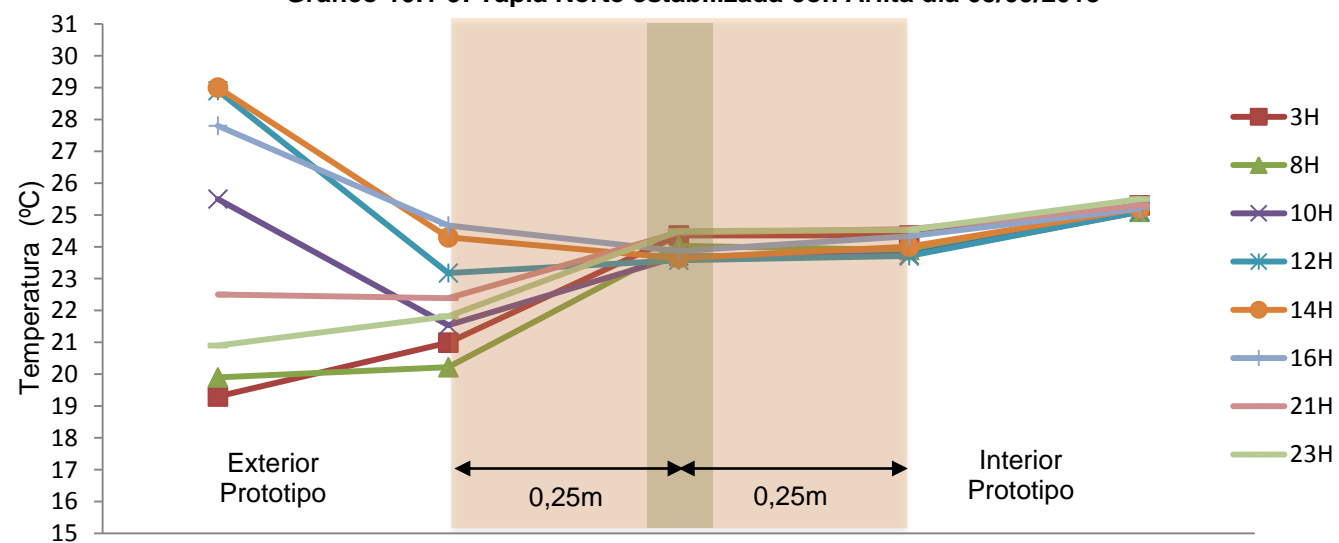


Gráfico 10.1-10: Tapia Norte sin estabilizar día 05/09/2013

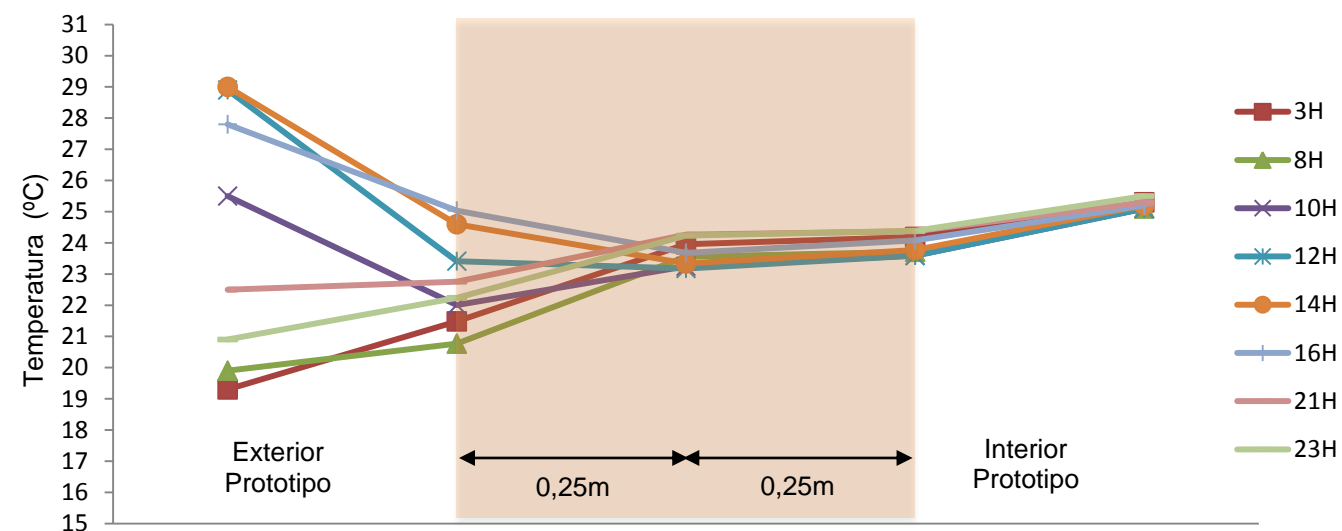


Gráfico 10.1-11: Tapia Sur sin estabilizar día 05/09/2013

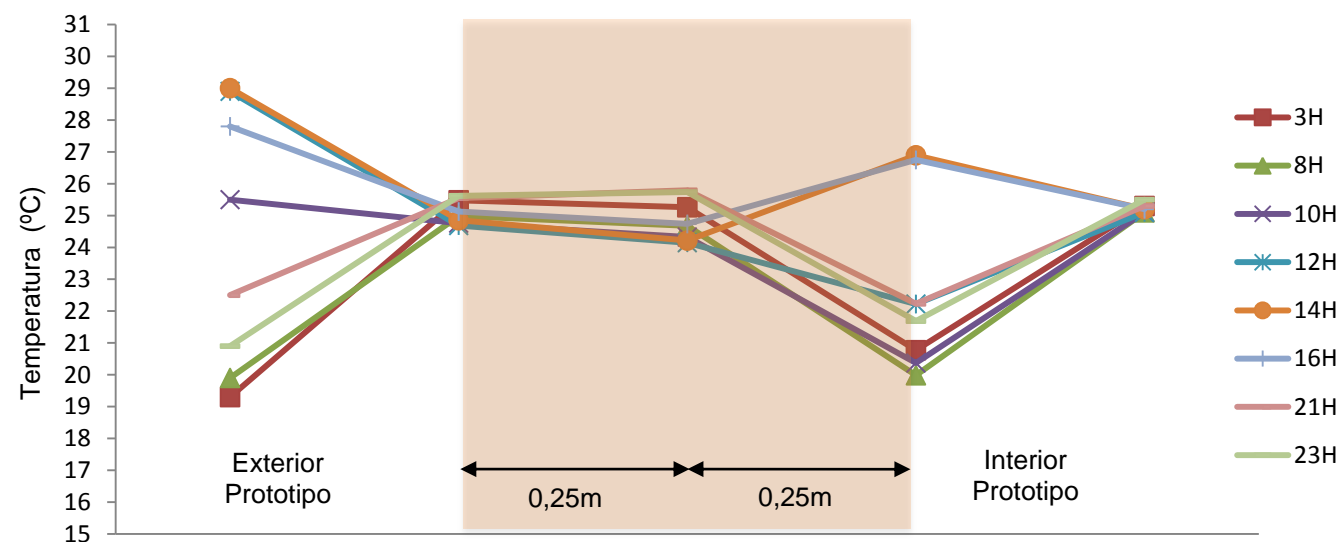
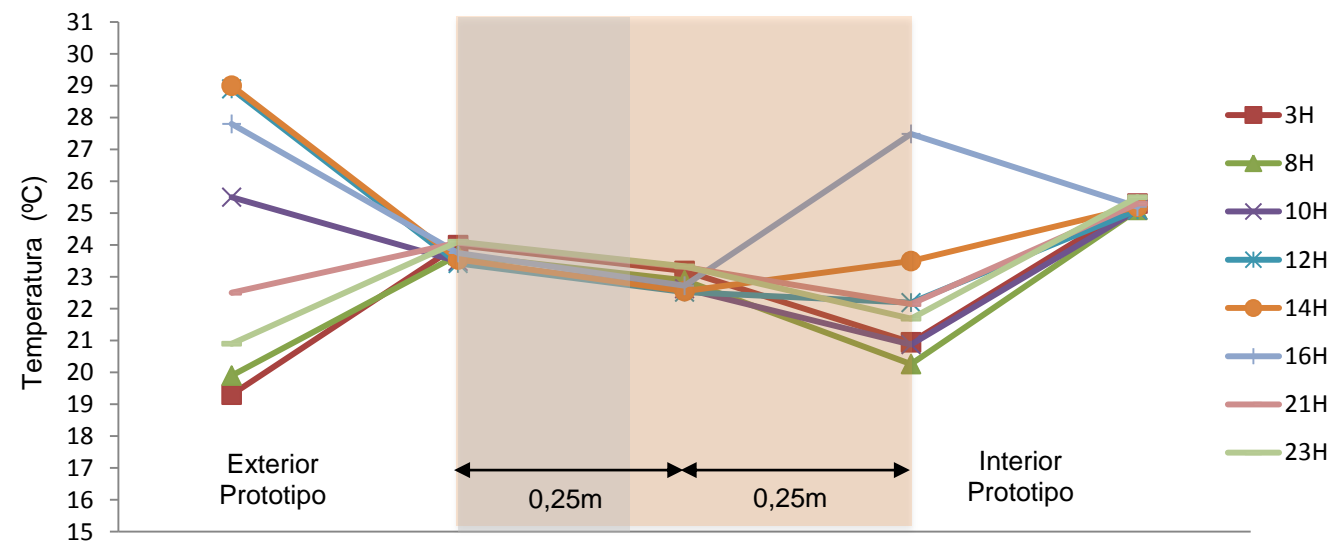


Gráfico 10.1-12: Tapia Sur estabilizada con cemento día 05/09/2013



Como podemos ver en los gráficos del mes de Septiembre, en la cara Norte del prototipo hay un comportamiento térmico muy parecido tanto por parte de la tierra sin estabilizar como de la tierra estabilizada con arlita. Así como podíamos ver que en los ensayos realizados en el laboratorio la tapia estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, daba mejores resultados que la tierra produciendo un salto térmico inferior entre el interior y el exterior del ensayo, en este caso no observamos esa diferencia.

Si podemos ver que a lo largo del día las temperaturas exteriores del muro son diferentes, pero a medida que se transmite el calor por el muro se equiparan sobre los 23,5°C, de media en el centro del muro en ambos casos, y se mantienen hasta el interior del muro.

En la cara Sur del prototipo, podemos apreciar claramente que el cemento hace de filtro frente el calor exterior un poco mejor que la tapia sin estabilizar, de tal forma que a cualquier hora del día la relación entre la temperatura exterior del muro y la central es siempre de pérdida de calor hacia el interior, 1,5°C de media.

Del centro del muro al interior del prototipo en la tapia estabilizada con cemento, podemos ver que a partir del momento en el que la tapia recibe radiación solar, entre 7:00h y 7:30h, las temperaturas empiezan a subir en la cara interior del prototipo hasta las 12h que parece que se empieza a estabilizar la interior con la temperatura central del muro. A partir de esa hora aumenta la temperatura siendo la interior mayor que la del interior del muro, hasta que deja de percibir radiación solar donde nuevamente descenden la temperatura. La diferencia entra la temperatura más baja y la más alta reflejada en el gráfico es de 7°C en el interior del prototipo y a lo largo del día.

Por otra parte, para la tierra sin estabilizar también observamos un comportamiento similar al de la tapia estabilizada con cemento; desde que sale el sol la tapia filtra el calor exterior produciendo una pequeña pérdida de calor entre el exterior del muro y su centro pero observamos que a las 16h, algo menos de unas 9 horas después de la incidencia del sol, esta variación tiende a estabilizarse entre la temperatura registrada en el exterior y en el centro del muro.

Lo que también podemos observar es que el comportamiento del centro del muro al interior del prototipo sigue el mismo patrón de conducta que con el cemento, es decir, las temperaturas empiezan a subir en la cara interior del prototipo hasta las 12h, siendo inferiores a las del centro del muro, y a partir de esa hora aumenta la temperatura siendo la interior mayor que la central, hasta que deja de irradiar el sol en esta orientación donde nuevamente descenden las temperaturas. La diferencia entra la temperatura más baja y la más alta reflejada en el gráfico es de 7°C en el interior del prototipo y a lo largo del día.

Gráfico 10.1-13: Tapia Norte estabilizada con Arlita día 15/10/2013

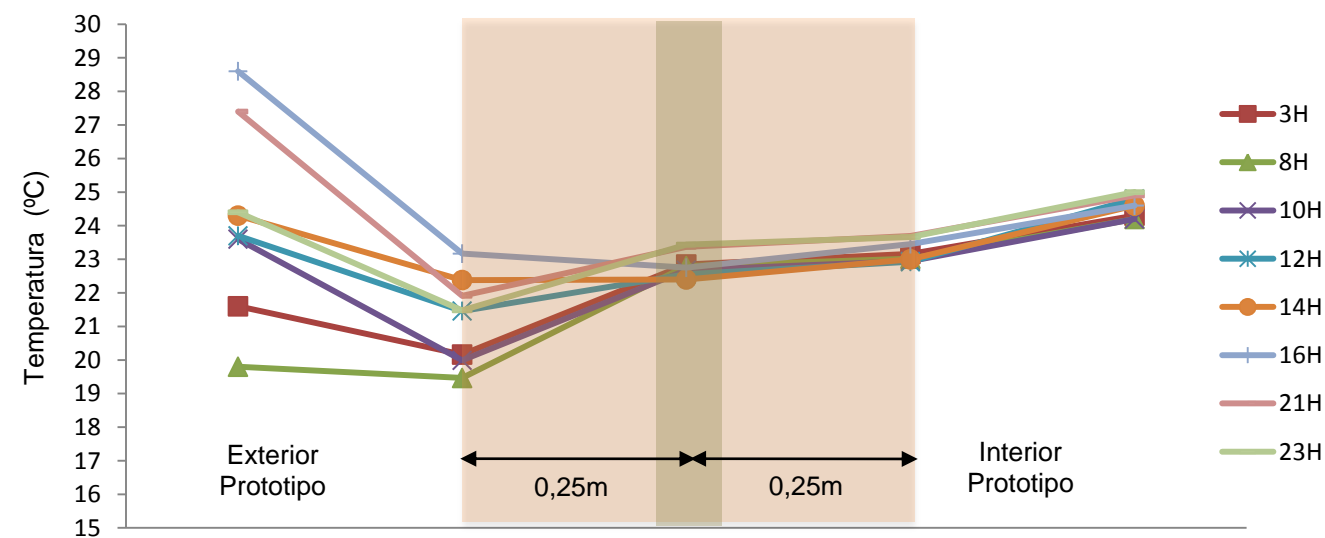


Gráfico 10.1-14: Tapia Norte sin estabilizar día 15/10/2013

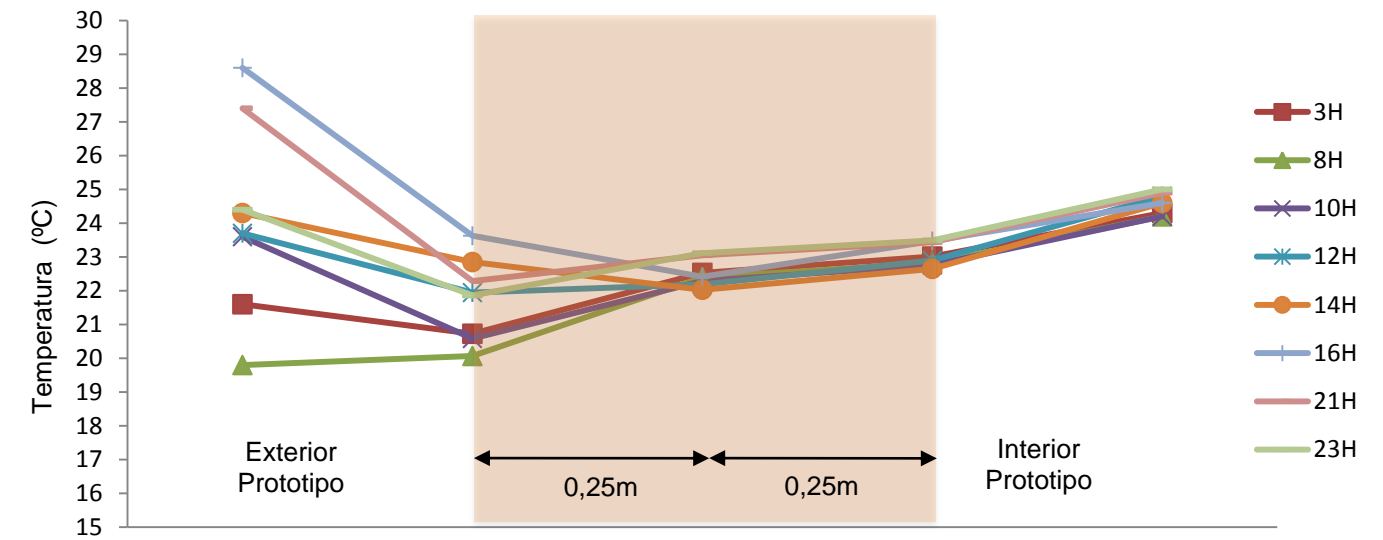


Gráfico 10.1-15: Tapia Sur sin estabilizar día 15/10/2013

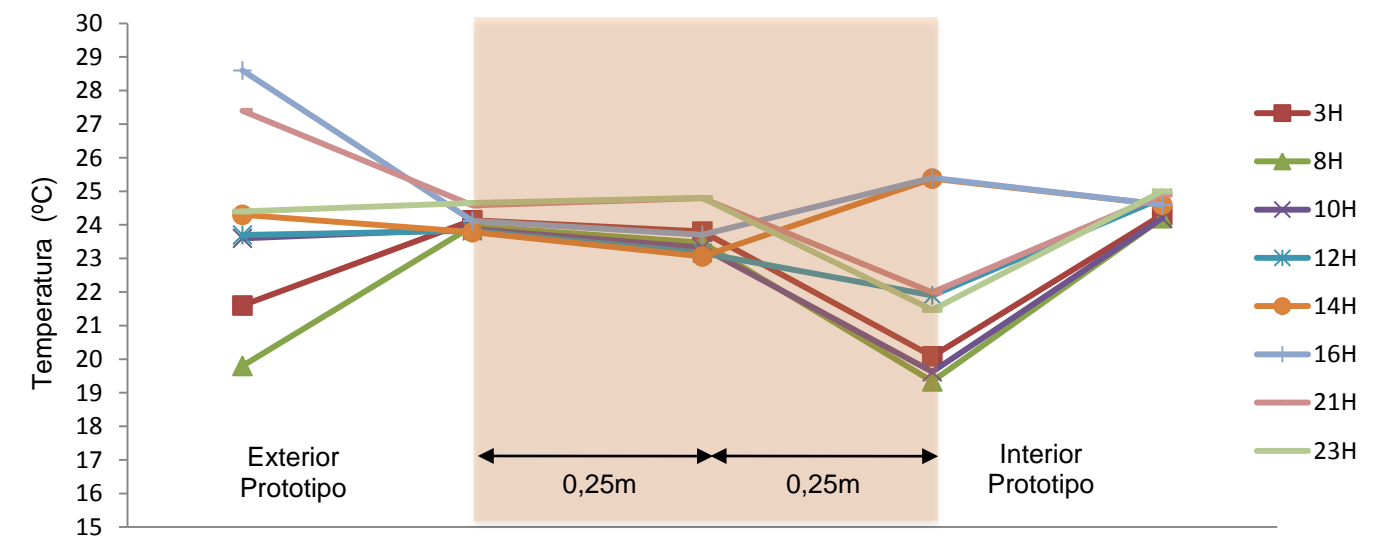
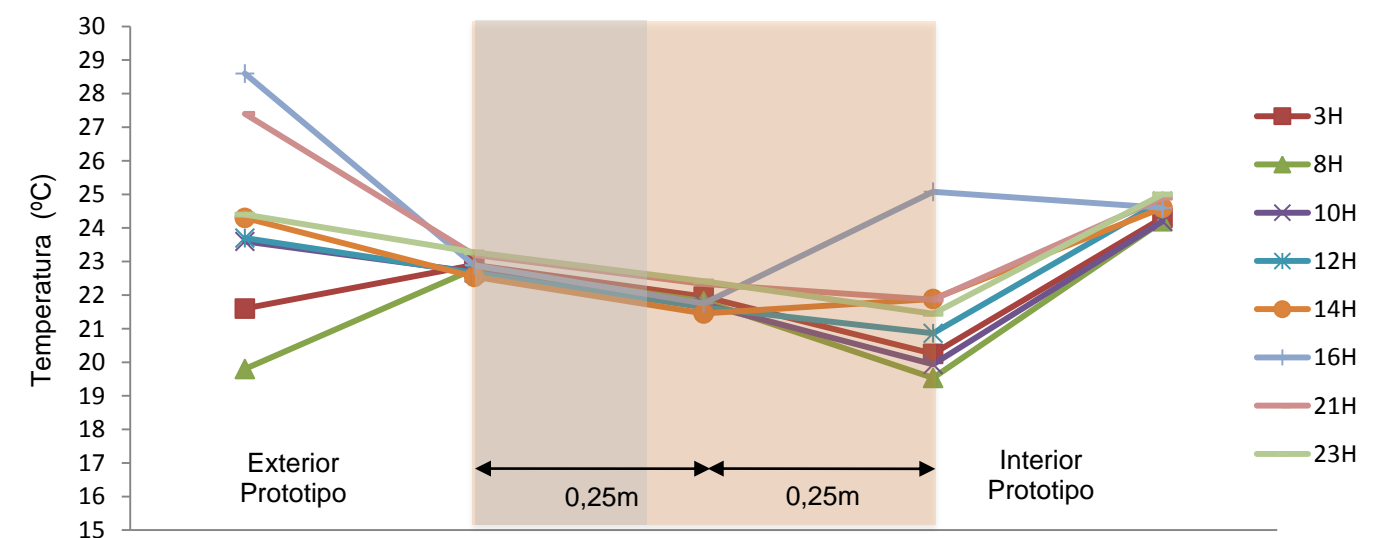


Gráfico 10.1-16: Tapia Sur estabilizada con cemento día 15/10/2013



Como podemos ver en los gráficos del mes de Octubre, en la cara Norte del prototipo hay un comportamiento térmico muy parecido tanto por parte de la tierra sin estabilizar como de la tierra estabilizada con arlita. Así como podíamos ver que en los ensayos realizados en el laboratorio la tapia estabilizada con arlita, hasta 10mm de diámetro, daba mejores resultados que la tierra produciendo un salto térmico inferior entre el interior y el exterior del ensayo, en este caso no observamos esa diferencia.

Si podemos ver que a lo largo del día las temperaturas exteriores del muro son diferentes, pero a medida que se transmite el calor por el muro se equiparan sobre los 22,5°C, de media en el centro del muro en ambos casos, pero no se mantienen hasta el interior del muro tal y como sí sucedía durante los tres meses anteriores. Ahora la temperatura interior del prototipo es ligeramente superior a la central pero no puede ser a causa de la temperatura interior del prototipo porque ya hubiéramos visto esta relación en las gráficas anteriores. Podría ser que la causa de esta variación fuera el calor acumulado durante los últimos días o meses, o que es el comportamiento normal del cerramiento. Actualmente no podemos saber la causa real de este dato pero la continuación de este proyecto sí podrá aclarar todas estas dudas.

En la cara Sur del prototipo, podemos apreciar claramente que el cemento hace de filtro frente el calor exterior un poco mejor que la tapia sin estabilizar, de tal forma que a cualquier hora del día la relación entre la temperatura exterior del muro y la central es siempre de pérdida de calor hacia el interior, 1,5°C de media.

Del centro del muro al interior del prototipo en la tapia estabilizada con cemento, podemos ver que a partir del momento en el que la tapia recibe radiación solar, entre 7:30h y 8:00h, las temperaturas empiezan a subir en la cara interior del prototipo hasta las 12h que parece que se empieza a estabilizar la interior con la temperatura central del muro. A partir de esa hora aumenta la temperatura, siendo la interior mayor que la del interior del muro, hasta que deja de percibir radiación solar donde nuevamente desciende la temperatura. La diferencia entra la temperatura más baja y la más alta reflejada en el gráfico es de 5,5°C en el interior del prototipo y a lo largo del día.

Por otra parte, para la tierra sin estabilizar también observamos un comportamiento similar al de la tapia estabilizada con cemento; desde que sale el sol la tapia filtra el calor exterior produciendo una pequeña pérdida de calor entre el exterior del muro y su centro pero observamos que a las 16h, algo menos de unas 9 horas después de la incidencia del sol, esta variación tiende a estabilizarse entre la temperatura registrada en el exterior y en el centro del muro.

Lo que también podemos observar es que el comportamiento del centro del muro al interior del prototipo sigue el mismo patrón de conducta que con el cemento, es decir, las temperaturas empiezan a subir en la cara interior del prototipo hasta las 12h, siendo inferiores a las del centro del muro, y a partir de esa hora aumenta la temperatura siendo la interior mayor que la central, hasta que deja de irradiar el sol en esta orientación donde nuevamente descienden las temperaturas. La diferencia entra la temperatura más baja y la más alta reflejada en el gráfico es de 5,5°C en el interior del prototipo y a lo largo del día.

Lo que actualmente podemos decir es que el comportamiento térmico en Norte es muy igual tanto para la tapia estabilizada con arlita como para la tapia sin estabilizar y que no se presentan grandes cambios significativos.

El comportamiento térmico en Sur es también similar entre los dos paramentos pero la tapia estabilizada con cemento consigue temperaturas un poco más bajas en el centro de la tapia que la tierra sin estabilizar, y también consigue diferenciales de temperatura más pequeños en los meses de Junio y de Julio, que son los más cálidos, en comparación con la tapia sin estabilizar.

También podemos ver que en Sur, durante los cuatro meses estudiados, la temperatura del muro exterior es similar en cualquier momento del día, le afecte o no la radiación solar, desconocemos la causa de este fenómeno pero descartamos que la lectura de datos sea equivocada, ya que sí existe variación en la toma de datos aunque es mínima. Podría estar condicionada a la falta de corriente, por la distancia entre el sensor y el exterior, o por la sombra que generan los árboles situados delante.

Por último hay que decir que en Norte todo el cerramiento consigue mantener una temperatura prácticamente estable de 23°C a lo largo de todo el día y, en cambio, en el cerramiento Sur la temperatura interior oscila desde los 19°C a los 25°C en las horas de más insolación del día.

11. CONCLUSIONES

Durante los ocho meses que ha durado este Proyecto Final de Grado se han realizado numerosos ensayos, analizando las distintas fases de construcción de un cerramiento de tapia, con el objetivo de conocer el funcionamiento del sistema constructivo y definir una metodología de ensayos para garantizar su control de calidad.

Para empezar necesitamos conocer las características de la tierra utilizada, a través de los ensayos de caracterización de tierra. En nuestro caso disponemos de un suelo cohesivo formado por arcilla de mediana plasticidad que no contiene limos, con un límite líquido del 36% de humedad y un límite plástico del 24,05% de humedad. Estos datos no están dentro de las recomendaciones normativas con las que hemos comparado los ensayos, en este caso la normativa española para BTC, pero no significa que la tierra sea descartable simplemente es una recomendación en referencia a la experiencia empírica del material para la fabricación de un producto muy similar como es el BTC.

A demás este suelo se caracteriza por tener un 0,04% en sales solubles, un 1,5% de materia orgánica y un bajo contenido en nitratos, nitritos, sulfatos y cloruros. El factor determinante que nos catalogará la idoneidad de la tierra es su contenido en materia orgánica, que no puede ser superior al 2%. Las normativas actuales nos fijan unos límites máximos para el contenido de sales, porque el hormigón es vulnerable, pero la tierra no sufre alteraciones en función de su contenido de sales por lo que es necesario conocer estos valores pero sólo influirán en el momento en el que la tapia esté en contacto con una estructura de hormigón.

Una vez conocemos la tierra que vamos a utilizar la podemos modificar, mediante aditivos, para conseguir mejorar las prestaciones de la tapia a construir. En este proyecto utilizamos dos materiales para estabilizar la tierra como son el cemento Portland, para mejorar la resistencia a compresión de la tapia, y la arlita de diferente diámetros, para mejorar el aislamiento térmico de la tapia.

En este proyecto únicamente hemos estudiado, en el laboratorio, la tierra estabilizada con arlita; obtenido una caracterización de la tierra diferente a la inicial, donde pasa a ser clasificada como un suelo granular compuesto por gravas mal graduadas, mezclas de arenas y gravas con pocos finos o sin ellos; lo que implica una modificación de sus características iniciales haciéndola más permeable y menos compresible.

El segundo paso importante, después de conocer en profundidad cómo es nuestra materia prima, es realizar un estudio de la tapia construida mediante los ensayos de caracterización de la tapia. En nuestro caso, para los diferentes ensayos proctor realizados, tanto en laboratorio como *in situ*, obtenemos que la tapia sin estabilizar tiene una densidad seca media del 1,24g/cm³, lo que equivale a una compactación proctor del 76,30%, en contraposición a la tapia estabilizada con arlita que tiene una densidad seca media del 2,07g/cm³, lo que equivale a una compactación proctor del 73,75%. Estos datos reflejan dos características importantes, la primera es que la tapia sin estabilizar tiene un grado de compactación proctor superior al de la tapia estabilizada con arlita; y la segunda es que la densidad seca del centro del muro estabilizado con arlita es superior al conjunto de la tapia sin estabilizar. Los datos también nos reflejan que el cerramiento de tapia sin estabilizar está mejor compactado, dotando a la tapia de menos absorción de agua y porosidad, que el cerramiento de tapia estabilizada con arlita. Por otra parte, si consideramos sólo la zona central del muro estabilizado en comparación con el muro sin estabilizar, las prestaciones que incorpora la arlita como aditivo mejoran la compacidad, reduciendo la absorción de agua y la porosidad. En resumen, podemos ver que la zona central del muro estabilizado con arlita tiene un mejor comportamiento que el muro sin estabilizar pero que en conjunto está peor compactado, y solo el centro tiene esas prestaciones, por lo que obtendremos mejores resultado con la tapia sin estabilizar. La afirmación anterior la podemos corroborar a través de la velocidad de absorción de agua de los paramentos; donde las tapias estabilizadas, con cemento o con arlita, absorben el doble de agua en el mismo periodo de tiempo que la tapia sin estabilizar. Por lo que podemos demostrar que la tapia sin estabilizar tiene un mejor comportamiento frente a la absorción de agua.

Por último, se ha estudiado *in situ*, el índice de rebote de los paramentos donde se determina claramente que la tapia estabilizada con cemento es más resistente que el resto de las tapias analizadas. Este dato es interesante correlacionarlo con la resistencia a compresión del paramento a través de la construcción de probetas para ensayar en el laboratorio.

Este es uno de los motivos por los cuales se realizaron, en paralelo a la construcción del prototipo, unas probetas de tapia, con las mismas características que la original, para ser ensayadas en el laboratorio y poder correlacionar los datos obtenidos en ambas construcciones.

El tercer paso es estudiar, mediante los ensayos de caracterización de las probetas, aquellos aspectos interesantes, que expliquen mejor este sistema constructivo pero, que no se pueden ensayar *in situ*. En nuestro caso hemos construido cinco probetas del mismo espesor del paramento original, 0,5m de espesor, para encontrar datos lo más aproximados a la realidad del elemento constructivo final. Se ha analizado la resistencia de los paramentos donde destacamos su baja resistencia a compresión, descartando la posibilidad de considerar la tapia como elemento estructural, pero hemos encontrado una relación directa entre estos datos y índice de rebote; por lo que, con un estudio futuro más detallado en estos dos ensayos, podremos llegar a relacionar la resistencia del material a través de su índice de rebote, de la misma forma que en hormigones.

A partir de ensayos con ultrasonidos se ha concluido que los paramentos tienen una alta porosidad. Está porosidad se puede relacionar con las densidades obtenidas en los ensayos proctor; los datos obtenidos reflejan que la tapia sin estabilizar es menos porosa que la tapia estabilizada con arlita, disminuyendo su velocidad de absorción de agua y mejorando su compacidad.

Se han estudiado las transmitancias de los paramentos y se concluye que no cumple con las exigencias del CTE, pero que su retardo térmico y su coeficiente de amortiguamiento nos indican que es un paramento con una buena inercia térmica; y podemos relacionar estos datos con los obtenidos en la monitorización del prototipo.

También se ha estudiado el comportamiento térmico de las probetas con ensayos de simulación, para verano y para invierno; donde podemos destacar que la tapia estabilizada con arlita tiene un mejor comportamiento térmico, en ambas situaciones, ya que su salto térmico, entre el interior y el exterior, es menos pronunciado y la temperatura interior se mantiene más estable que el resto de paramentos estudiados.

El último paso es estudiar, mediante la monitorización del prototipo, el comportamiento real de la tapia en clima mediterráneo y en ciudad. Nuestro estudio abarca cuatro meses entre verano y principios de otoño (Junio, Julio, Septiembre y Octubre), donde podemos determinar que en orientación Norte la tapia tiene el mismo comportamiento, tanto si está estabilizada como si no lo está; en cambio en orientación Sur, la tapia estabilizada con cemento tiene un mejor comportamiento que la tapia sin estabilizar ya que proporciona una menor entrada de calor del exterior al interior del prototipo.

Con todos los datos recopilados, teniendo presente que únicamente disponemos de datos comparables sobre el comportamiento del sistema constructivo cuando las temperaturas son cálidas, podemos decir que descartamos la tapia estabilizada con arlita como material apropiado para la construcción de viviendas porque no cumple con la función principal para la que fue diseñada, el correcto aislamiento térmico del prototipo. Como hemos comprobado, su transmitancia es superior a la máxima exigida por el CTE por lo que habría que aislarlo térmico, y si lo comparamos con la tapia sin estabilizar observamos que sus cualidades de resistencia, de velocidad de absorción de agua, de compactación, etc. son peores que las de la tapia sin estabilizar por lo que es mejor construir una tapia sin estabilizar y aislarla.

Por otra parte, necesitaríamos más datos para decidir si la tapia estabilizada con cemento es mejor que la tapia sin estabilizar, en este proyecto no se ha podido ensayar lo suficiente la tapia estabilizada con cemento debido a la falta de material durante la obra, pero hay que destacar que las expectativas que genera son buenas y posiblemente la mejor opción de las tres analizadas en este proyecto sea la tapia estabilizada con cemento, aunque sería necesario analizar la monitorización del prototipo en invierno a ver cómo se comporta.

Lo que se ha pretendido con este proyecto es conocer un poco mejor el sistema de construcción con tapia y aportar algo más, para que poco a poco otros puedan llegar a catalogar la tapia como una alternativa constructiva más, entre la diversidad que existe actualmente, y para dotar de herramientas para su rehabilitación en construcciones existentes.

12. BIBLIOGRAFÍA

CITAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] S. Ediciones El País, «El País,» Prisa, 30 Octubre 2011. [En línea]. Available: <http://www.elpais.com/especial/7000-millones/>. [Último acceso: 25 Septiembre 2013].
- [2] D. ABC, «Diario ABC,» Diario ABC, S.L., 15 Junio 2013. [En línea]. Available: <http://www.abc.es/sociedad/20130614/abci-poblacion-mundial-crecera-201306141214.html>. [Último acceso: 18 Octubre 2013].
- [3] F. Font y P. Hidalgo, El Tapial: una tècnica constructiva mil·lenària, Castelló, 1991.
- [4] G. Minke, Manual de construcción en tierra, Segunda edición ed., Kassel, Alemania: Fin de Siglo, 2005.
- [5] España, Documento básico Seguridad Estructural Cimientos, Madrid: Editorial Tecnos, 2007, corrección de errores 2008.
- [6] J. Cid, F. Mazarrón y I. Cañas, «Las normativas de construcción con tierra en el mundo,» *Informes de la construcción*, vol. 63, nº 523, pp. 159-169, Julio-septiembre 2011.
- [7] D. García Alcaraz, Estudi de revestiments amb fibres vegetals, Barcelona: PFG, UPC, 20013.
- [8] L. Milla, Desarrollo y estudio de revestimientos con tierra y fibras vegetales a base de paja de cebada y cascarilla de arroz, Barcelona: PFM, UPC, 20013.
- [9] C. Wagner M., «El tubo Karsten,» *Revista Bit*, pp. 48 - 49, Septiembre 2010.
- [10] IDAE, Guía práctica para de la energía. Consumo eficiente y responsable, Madrid: IDAE, 2011.
- [11] L. Allepuz y C. Poza, «Informe de las propiedades físicas y mecánicas de la casa S-LOW,» TFG, UPC, Barcelona, 2013.

DOCUMENTOS DE SOPORTE ESCRITO:

Font, Fermín; Hidalgo, Pere. *Arquitectura de tapia*. Castellón: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Castellón, [2009]. ISBN 9788461331420.

Cuchí, Albert. *Les Construccions de terra a Catalunya: la tècnica de tàpia*, tesi doctoral, UPC, Departament de Construccions Arquitectòniques I, 1994. // García, Joan. "La Tàpia, una realitat", TFC, UPC, EPSEB, 1999.

Serrano, Susana. *La tapia como sistema constructivo tradicional. Optimización y mejora de las propiedades térmicas y Análisis de Ciclo de Vida*. TFG, UPC, UdL, 2012.

Badia Grañana, Ana. *Análisis de la tapia en obra construida en partir de la caracterización del material, ensayos no destructivos (ndt) y ensayos destructivos (dt)*. Proyecto final de grado EE, UPC, EPSEB, 2013.

Morera Roca, Gisela y Pallarès Madrid, Ángeles. *Criterios de ejecución y control de calidad en la construcción en tierra de una vivienda unifamiliar en Martorelles*. Proyecto final de carrera GEE, UPC, EPSEB, 2012.

Gatti, Fabio. *Arquitectura y construcción con tierra. Estudio comparativo de las técnicas comparativas con tierra*. Proyecto final de máster, UPC, ETSAB, 2012.

Minke, Gernot. *Manual de construcción en tierra, La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Ediciones EcoHabitar (2010).

Minke, Gernot. *Viviendas antisísmicas de tierra. Reglas para el diseño de sistemas estructuras favorables*. Ediciones EcoHabitar (2013).

Bestraten, S.; Hormías, E.; Altemir, A (2011). *Construcción con tierra en el siglo XXI*. Informes de la Construcción (Vol 63, Nº 523).

Font, F.; Hidalgo, P (2011). *La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos*. Informes de la Construcción (Vol 43, Nº 523).

Varios autores. *Apuntes de la asignatura de Materiales de Construcción. Ingeniería de la Edificación*. Barcelona: Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, UPC.

Sastre Sastre, Ramón. *Propietats del materials i els elements de contrucció*. Ediciones UPC, noviembre 2000.

DOCUMENTOS DE SOPORTE NORMATIVO:

Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986-1996). *Conjunto de Normas Técnicas brasileiras NBR*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Bureau of Indian Standards (1980). *Code of practice for in-situ construction of walls, in building soil-cement*. IS 2110:1980. India: Bureau of Indian Standards (BIS).

Constructuin Industries Division CID of the regulation and Licensing Departament. (2004). *New Mexico Earthen Buildings Materials Code. NMAC 14.7.4*. Santa Fe: Construction Industries Division CID of the regulation and Licensing Departament.

España. Ministerio de Fomento (2006). *DB SE-AE: Acciones de la edificación. Código Técnico de la Edificación*. Real Decreto 314/2006. Madrid: Centro de publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Fomento.

España. Ministerio de Fomento (2006). *DB SE-F: Fábrica*. Real Decreto 314/2006. Madrid: Centro de publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Fomento.

España. Ministerio de Fomento (2006). *DB HE: Ahorro de energía. Código Técnico de la Edificación*. Real Decreto 314/2006. Madrid: Centro de publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Fomento.

España. Ministerio de Fomento (2013). *DB HE: Ahorro de energía. Código Técnico de la Edificación*. Real Decreto 314/2006. Madrid: Centro de publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Fomento.

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1977) *UNE 7-368-77: Determinación con agua oxigenada del contenido de materia orgánica en los suelos*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

<http://www.fabra.cat/meteo/resums/resums.html> Consulta sobre datos estadísticos sobre temperaturas máximas mensuales (*Fecha de consulta el 04/11/2013 y el 08/11/2013*).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1993) *UNE 103-104-93: Determinación del límite plástico de un suelo*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1994) *UNE 103-103-94: Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1994) *UNE 103-501-94: Ensayo de compactación. Proctor modificado*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1995) *UNE 103-102-95: Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1995) *UNE 103-101: Análisis granulométrico de suelos por tamizado*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (2006) *UNE 103-205: Determinación del contenido de sales solubles de un suelo*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

SNZ (1998). *Engineering design of earth buildings*. NZS 4297. Wellington: Standards New Zealand (SNZ).

SNZ (1999). *Earth buildings not requiring specific design*. NZS 4299. Wellington: Standards New Zealand (SNZ).

SNZ (1998). *Materials and workmanship for earth buildings*. NZS 4298. Wellington: Standards New Zealand (SNZ).

CONSULTAS WEBS:

<http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/> Consulta del documento básico de seguridad estructural de la madera (DB SE-M), del documento básico de seguridad estructural para fábrica (DB SE-F) y los documentos básicos de ahorro de energía (DB HE). (*Fecha de consulta 06/05/2013 y 15/10/2013*).

<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/> Consulta de normativas de los ensayos realizados. (*Fechas de consulta desde el 29/04/2013 hasta el 01/11/2013 de forma puntual*).

<http://www.casaslow.com/> Web de la empresa S-Low. (*Fecha de consulta 26/05/2013*).

<http://www.ramos.utfsm.cl/doc/1072/sc/TuboKarsten.pdf> Consulta sobre el proceso de ejecución del ensayo con tubo Karsten y sus posibles mejoras (*Fecha de consulta 27/10/13*).

<http://www.tv3.cat/3alacarta/#/videos/4698072> Documental sobre la problemática de la extracción masiva de arenas (*Fecha de consulta 10/10/13*).

<http://www.meteo.cat/xema/AppJava/SeleccioPerComarca.do> Consulta de los datos de la estación meteorológica de zona universitaria (*Fecha de consulta desde 01/06/2013 hasta 07/06/2013*).

13. AGRADECIMIENTOS

Quisiera dar las gracias a todas aquellas personas que han participado, directa o indirectamente, en la realización de este proyecto:

- Montserrat Bosch y Antonia Navarro, tutoras de este proyecto, no sólo por la gran ayuda que han prestado durante todo el proyecto sino por la gran involucración en que han demostrado con todos nosotros.
- Sandra Martín y Ángel Estévez, los precursores del sistema modular S-Low.
- Luis Allepuz y Cristian Poza, por compartir su trabajo y experiencia conmigo, y estar siempre dispuestos a ayudarme en todos lo que necesitara.
- Laura Milla y Diego García, por compartir algo más que un poco de tierra y unos cuantos datos.
- Anna Barrero y Oriol Carrillo, becarios del laboratorio del fuego, por su gran trabajo realizando la monitorización del prototipo, ayudando con la monitorización de las probetas, resolviendo dudas sobre algunos ensayos y sobre todo por la paciencia y la comprensión que han tenido conmigo durante cuatro meses.
- Bladimiro Seoane, becario del laboratorio de materiales, por toda la ayuda proporcionada durante la realización de ensayos en el laboratorio.
- Laura Gaspar, por toda la ayuda proporcionada y por creer que la continuidad de este proyecto era un buen tema para su Proyecto Final de Grado.
- Nuria Gubianas y Mariana Paloumbo, por compartir, repartir y organizar de forma eficiente el uso del material de forma simultánea.
- A todo el laboratorio de materiales, pero en especial al Marc Tous, Imna Cantalapiedra, Anna Lacasta.
- Colaboración de la Universidad de Lleida (UDL) desde el centro de investigación GREA innovación concurrente.
- Personal de mantenimiento, por facilitarnos el trabajo durante todo el proceso constructivo y tomarse con una actitud positiva todas las molestas que se les haya podido ocasionar durante el proyecto.
- A mi familia, amigos y compañeros de trabajo por ser tan pesada y monotemática durante los últimos 8 meses.